



expérimentations  
navettes autonomes

# Analyse des essais sur piste et Recommandations sur la Dynamique des navettes vis-à-vis du Maintien de l'équilibre et du Risque de chute pour les passagers



Le projet est soutenu dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir  
opéré par l'ADEME  
Appel à projet EVRA Expérimentation du véhicule routier autonome  
Convention de contractualisation n° 1982C0050

Projet labellisé par



## **Information**

Livrable L 3.3.1

Version 1.0 (en attente d'approbation Copil / Ademe)

Date : 12.11.2021

Niveau de diffusion : Confidentiel

## **Auteurs**

Thomas Robert – Université Gustave Eiffel

Daniel Lechner – Université Gustave Eiffel

Mael Bergé – Université Gustave Eiffel

Sébastien Domestici – Université Gustave Eiffel

## **Relecteurs**

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Astrid Bocher – Université Gustave Eiffel

## **Coordinateur**

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Université Gustave Eiffel

Cité des mobilités - 25 av. François Mitterrand, Case 24

69675 Bron Cedex

France

Tel : +33 4 72 14 23 79

Email : [philippe.vezin@univ-eiffel.fr](mailto:philippe.vezin@univ-eiffel.fr)

[www.experimentations-navettes-autonomes.fr](http://www.experimentations-navettes-autonomes.fr)



## Avertissement

Les informations contenues dans ce document sont fournies « en l'état » et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. Les membres du consortium ne seront pas responsables des dommages de toute nature, y compris, sans limitation, les dommages directs, spéciaux, indirects ou consécutifs qui peuvent résulter de l'utilisation de ces matériaux, sous réserve de toute responsabilité obligatoire en raison de la loi applicable. Bien que les efforts aient été coordonnés, les résultats ne reflètent pas nécessairement l'opinion de tous les membres du consortium ENA.

© 2020 Consortium ENA



# RESUME EXECUTIF

Transporter des passagers assis ou debout dans une navette autonome implique une gestion de la dynamique du véhicule qui assure un compromis entre la sécurité et le confort des occupants et les performances opérationnelles de la navette. Le résultat de ce compromis est déterminant pour l'acceptabilité de la navette. L'objectif général de la Tâche 3.3 d'ENA dans laquelle s'inscrit ce livrable est donc de proposer des recommandations pour obtenir ce meilleur compromis.

L'étude de la littérature fait ressortir que des dynamiques tout à fait classiques de véhicules de transports en commun sont suffisantes pour engendrer des déséquilibres et des chutes. Un deuxième point est que la relation entre la dynamique du véhicule et le déséquilibre induit pour les passagers est complexe et dépend de nombreux facteurs. Il est donc difficile d'anticiper le ressenti dans une situation réaliste pour un nouveau véhicule tel qu'une navette autonome. Il apparaît donc nécessaire de mener une étude spécifique sur ces navettes.

Ce livrable présente : les expérimentations qui ont été mises en place pour évaluer le ressenti de passagers de la navette dans différentes situations contrôlées ; les premières analyses de la dynamique des navettes et du ressenti de ces passagers recueillis lors de ces expérimentations ; les premières recommandations, très partielles et globales à ce stade.

Les expérimentations ont été menées sur les pistes fermées du site des Fromenteaux (UGE-TRANPOLIS). La navette utilisée pour ces expérimentations est une navette autonome (AUTONOM SHUTTLE) ARMA de Navya appartenant à l'Université Gustave Eiffel.

Vingt-trois personnes ont pris part à notre étude. Ils avaient pour consignes de se placer selon certaines positions debout (4) et assises (2) dans la navette pendant que celle-ci effectuait des situations dites « unitaires » (15 conditions, chacune répétées lors d'un aller-retour entre deux stations) reprenant une situation précise (ligne droite et/ou virage, dynamique bien spécifique) et des situations plus écologiques de types « circuit » (2 circuits avec différents paramétrages de la dynamique de la navette). Sur ces différentes conditions nous avons fait varier la consigne de vitesse, d'accélération et de décélération.

Les participants ont dû évaluer leur ressenti vis-à-vis de la navette de manière globale (questionnaire papier) mais aussi de façon plus spécifique (questionnaire analogique et appui sur un capteur de force au cours de l'essai). La dynamique de la navette (centrale inertielle interne, 200Hz) et des participants (EMMAPhones, 100Hz) était également mesurée.

L'ensemble de l'expérimentation est présenté, dans ce livrable, bien que seule une partie des mesures et résultats y soit analysé.

## Ressenti global :

- Navette globalement perçue comme sécuritaire par les passagers.
- Différences de perception selon la situation : les positions debout engendrent un inconfort/déséquilibre plus important, tandis que les démarrages sont moins inconfortables que les autres phases (virages et freinages).
- Lors des circuits, l'allure de la navette a été jugée trop faible. Néanmoins, la majorité des passagers ont ressenti des situations de déséquilibre au cours de ces circuits
- L'augmentation de la consigne d'accélération (circuit 2) n'améliore pas la sensation d'allure, jugée trop faible, mais augmente les déséquilibres et inconforts perçus.

### Profils d'accélération de la navette lors des essais unitaires :

- Dynamiques de la navette très répétables mais présence de certaines irrégularités (oscillations importantes avec des consignes d'accélération/décélération qui sont parfois dépassées).
- Plus les consignes de dynamique sont importantes plus ces irrégularités sont présentes et importantes.

Ces variations pourraient être responsables d'une partie du ressenti d'inconfort et déséquilibre des passagers. Il serait donc important d'étudier plus en détails la relation entre la dynamique exacte de la navette et le ressenti des passagers. Cette étude fera l'objet d'un prochain livrable.

### Étude du ressenti lors des essais unitaires :

- Les positions debout sont les plus inconfortables.
- La phase de démarrage apparaît comme étant la moins pénalisante pour les passagers.
- La vitesse n'est pas un paramètre influençant le ressenti des passagers en termes d'inconfort pour les phases de démarrage et de freinage.
- La vitesse est à prendre en compte pour la phase de virage (accélération centrifuge).
- Les situations avec un différentiel de vitesse nul entre ligne droite et virage engendrent un niveau d'inconfort plus faible.
- Des consignes de dynamiques plus élevées (Acc et Dec) augmentent le niveau d'inconfort ressenti.
- Cependant, une augmentation de la consigne d'accélération à  $1\text{m/s}^2$  n'affecte que légèrement le ressenti lors du démarrage, mais le dégrade nettement pour la phase de virage.

La navette apparaît donc comme relativement sécuritaire pour les passagers. Le risque de chute, pour les situations sur pistes testées, est limité. Cependant, certaines caractéristiques de la navette mériteraient d'être améliorées :

- Positionnement : Les positions debout sont les plus contraignantes pour les passagers. Cependant, il existe une différence entre le niveau d'inconfort ressenti pour les positionnements debout de dos/face et latéral au sens de la marche (niveau d'inconfort Assis Dos au sens de la marche/Debout Face au sens de la marche (AD/DF) > Debout Latéralement au sens de la marche et Dos aux portes/Debout Latéralement au sens de la marche et Face aux portes (DLD/DLF). Il pourrait être intéressant de trouver des solutions permettant d'inciter les passagers debout dans la navette à privilégier un positionnement latéral au sens de la marche.
  - Vitesse : il serait intéressant de pouvoir augmenter la vitesse de la navette sur certaines portions afin d'améliorer l'acceptabilité. En revanche, cela nécessitera d'étudier plus profondément les transitions avec les virages, et surtout de limiter l'occurrence de freinages intempestifs/urgences.
  - Profils de dynamique : les profils temporels d'accélération lors des phases de démarrage, freinage et prise de virage mériteraient d'être retravaillés afin d'améliorer les performances de la navette tout en limitant le ressenti d'inconfort/déséquilibre des passagers.

Il faut évidemment garder à l'esprit les biais de cette évaluation : essais sur pistes fermées et non sur site réel, biais de recrutement (population jeune et technophile), biais de situation (participants à une expérimentation scientifique et non simple usager), etc. Il serait donc intéressant de compléter ces observations lors d'une campagne en exploitation sur l'un des sites expérimentaux du projet.



# TABLES DES MATIERES

Tables des Matières.....	i
1. Introduction.....	3
1.1. Contexte, objectifs généraux.....	3
1.2. Littérature/Existant .....	3
1.3. Objectifs du livrable.....	3
2. Expérimentations .....	5
2.1. La navette utilisée et son pilotage .....	5
2.2. Population .....	6
2.3. Procédure .....	6
2.3.1. Scénarios considérés .....	6
2.3.2. Positionnement des personnes participant à la recherche.....	8
2.4. Outils de mesure .....	9
2.4.1. Questionnaires .....	9
2.4.2. EMMAPhone.....	10
2.4.3. Dynamomètre à main.....	10
3. Analyses.....	11
3.1. Traitements des données .....	11
3.1.1. Filtrage.....	11
3.1.2. Synchronisation temporelle des différents capteurs .....	11
3.1.3. Recalage spatial .....	11
3.1.4. Normalisations .....	11
3.2. Analyses statistiques : .....	12
4. Résultats.....	13
4.1. Réaction face à la navette .....	13
4.1.1. Ressenti global.....	13
4.1.2. Analyse du ressenti lors du circuit (réglage nominal) .....	14
4.1.3. Analyse du ressenti lors du circuit (réglage 2).....	15
4.2. Dynamique de la navette lors des essais unitaires .....	16
4.3. Analyse du ressenti lors des essais unitaires.....	19
4.3.1. Observation globale des notes de ressenti .....	20
4.3.2. Influence de la position des passagers et de la phase pour des réglages de vitesse et de dynamique nominaux.....	20
4.3.3. Influence de la vitesse consigne pour des dynamiques nominales.....	24
4.3.4. Influence des consignes d'accélération/décélération sur les notes de ressenti.....	28

5.	BILAN ET PERSPECTIVES .....	33
5.1.	Principaux résultats .....	33
5.1.1.	Ressenti global.....	33
5.1.2.	Profils d'accélération de la navette lors des essais unitaires .....	33
5.1.3.	Étude du ressenti lors des essais unitaires.....	34
5.2.	Limitations et perspectives .....	34
5.3.	Conclusion .....	35
6.	REFERENCES .....	37
	ANNEXE A : QUESTIONNAIRE GLOBAL .....	39
	ANNEXE B : QUESTIONNAIRE CIRCUIT.....	41
	ANNEXE C : DYNAMIQUE NAVETTE REG 2-3.....	42
	ANNEXE D : QUESTIONNAIRE « ESSAIS UNITAIRES ».....	45
	ANNEXE E : QUESTIONNAIRE « FREINAGE D'URGENCE » .....	46

# 1. INTRODUCTION

## 1.1. CONTEXTE, OBJECTIFS GENERAUX

Ce livrable est le premier de la Tâche 3.3 d'ENA dont l'objectif est d'étudier l'inconfort et le risque de chute des passagers induits par la dynamique de la navette (accélération, virages, freinages, ...).

En effet, le fait de transporter des passagers assis ou debout implique une gestion de la dynamique du véhicule qui assure un compromis entre la sécurité et le confort des occupants et les performances opérationnelles de la navette. Le résultat de ce compromis est déterminant pour l'acceptabilité de la navette.

L'objectif général de cette tâche est donc de proposer des recommandations pour obtenir ce meilleur compromis.

## 1.2. LITTERATURE/EXISTANT

Plusieurs études existent sur la relation entre la dynamique d'un véhicule et ses conséquences sur l'inconfort et le risque de chute de ses passagers.

Le premier résultat important est le fait que des dynamiques tout à fait classiques de véhicules de transports en commun sont suffisantes pour engendrer des déséquilibres et des chutes (De Graaf et Van Weperen, 1997 ; Omino, 2006 ; Beurier, 2012 ; Powell et Palacín, 2015).

Le deuxième enseignement que l'on peut tirer de cette littérature est que cette relation dynamique/déséquilibre induit est complexe et dépend de nombreux facteurs : la position des passagers et la direction de la perturbation subie (Aoki et al., 2009), le type d'appuis (Sarraf et al., 2014 ; Ayk et Griffin, 2015), l'expérience et les capacités fonctionnelles des passagers (Carbonneau et Smeesters, 2014 ; Schubert et al., 2017), mais aussi le profil temporel de l'accélération. Ce dernier peut être de différente nature (oscillations de type sinusoïdales ou transitions (démarrage/freinage) présentant un profil en forme de trapèze par exemple), avec différents paramètres caractéristiques influents : valeur maximale de l'accélération évidemment mais aussi fréquence pour les oscillations (Nawayseh et Griffin, 2006), durée et Jerk (dérivée temporelle, Vallée et al., 2016 ; Robert et al., 2018) pour les trapèzes. Ces résultats nous indiquent les grandes tendances et l'influence des principaux facteurs, mais il reste difficile d'anticiper le ressenti dans une situation réaliste, notamment pour un nouveau véhicule tel qu'une navette autonome.

Il apparaît donc nécessaire de mener une étude spécifique sur les navettes autonomes.

## 1.3. OBJECTIFS DU LIVRABLE

Les objectifs de ce premier livrable sont

- de décrire les expérimentations qui ont été mises en place pour évaluer le ressenti de passagers de la navette dans différentes situations contrôlées,
- de présenter les premières analyses du ressenti des passagers et d'en déduire des premières recommandations, très partielles et globales à ce stade.



## 2. EXPERIMENTATIONS

Une série d'expérimentations a été menée sur pistes fermées du site des Fromenteaux (UGE-TRANSPOLIS). Elles avaient pour objectif d'évaluer le ressenti des passagers de la navette en termes d'inconfort et de déséquilibre induits par la dynamique de la navette. L'ensemble de l'expérimentation est présenté dans ce livrable, bien que seul une partie des mesures et résultats y seront analysés. La suite des analyses sera présentée dans le livrable L.3.3.2.

Le protocole expérimental a été évalué et approuvé par le Comité pour la Recherche impliquant la Personne Humaine (CRPH) de l'Université Gustave Eiffel.

### 2.1. LA NAVETTE UTILISEE ET SON PILOTAGE

La navette utilisée pour ces expérimentations est une navette autonome (AUTONOM SHUTTLE) ARMA de Navya (cf. Figure 1) appartenant à l'Université Gustave Eiffel.

Cette navette peut contenir 15 personnes maximum : 4 personnes debout et 11 assises sur 8 sièges et 3 sur strapontins. Des poignées sont disponibles au plafond pour permettre aux passagers debout de s'accrocher, (Figure 3 & Figure 4).



FIGURE 1 : AUTONOM SHUTTLE, ARMA, NAVYA

Durant ces expérimentations, la navette était utilisée en mode autonome. Dans ce mode, la navette est programmée pour suivre un trajet (rail virtuel) avec des objectifs de vitesse (définis suite à des pré-tests) par tronçons. La navette utilisée était équipée d'un « patch » développé par Navya permettant de modifier certains paramètres du pilotage autonome, notamment la consigne d'accélération et de décélération longitudinale (hors freinage d'urgence). Trois réglages ont été utilisés (voir Tableau 1 ci-dessous). En revanche, nous n'avions pas accès à la gestion des transitions entre les tronçons successifs des parcours.

TABLEAU 1 : COMBINAISONS TESTEES DES REGLAGES DE LA CONSIGNE D'ACCELERATION ET DE DECELERATION

Réglages	Accélération	Décélération
réglage nominal (reg1)	0.3 m/s <sup>2</sup>	- 0.5 m/s <sup>2</sup>
réglage 2 (reg2)	1 m/s <sup>2</sup>	- 0.5 m/s <sup>2</sup>
réglage 3 (reg3)	1.5 m/s <sup>2</sup>	- 1.5 m/s <sup>2</sup>

Cette navette permet également de récupérer, hors ligne, les données de sa centrale inertielle (accélération longitudinale et vitesse angulaire selon les trois axes) et de la trame GPS RMC (données de vitesse, RMC : Recommended Minimum Navigation Information).

Un opérateur formé par Navya est présent dans la navette durant l'ensemble des essais afin de s'assurer du bon fonctionnement de la navette et de reprendre la main sur celle-ci, si la situation le nécessite.

## 2.2. POPULATION

Vingt-trois personnes ont pris part à notre étude : quinze hommes et huit femmes ; âge =  $25 \pm 3$  ans ; Masse =  $68,8 \pm 11$  kg ; Taille =  $174,7 \pm 8,6$  cm.

Les critères d'inclusion et d'exclusion étaient les suivants :

### ***Critères d'inclusion***

- Avoir entre 18 et 50 ans.
- Taille comprise entre 160 à 190 cm.

### ***Critères de non inclusion***

- L'existence d'un diagnostic de problèmes d'équilibre ou de trouble majeur de l'acuité ou du champ visuel.
- Une mobilité restreinte : difficulté à marcher sans aide à la mobilité pendant 60 minutes.
- Une pathologie de l'épaule pouvant entraîner des difficultés au maintien des poignées de toit pendant une période prolongée ou lors de freinages.
- Une contre-indication médicale à la pratique du sport.

## 2.3. PROCEDURE

### 2.3.1. Scénarios considérés

Deux types de situations étaient considérées : des situations dites « unitaires » reprenant une situation précise (ligne droite et/ou virage, dynamique bien spécifique) et des situations plus écologiques de types « circuit ». Ces situations étaient randomisées dans le but de limiter les effets liés à l'habituat

#### Circuits

Pour ces essais, la navette parcourait un circuit (Figure 2), enchaînant différentes sections de lignes droites, virages et arrêts avec pour chacune une consigne de vitesse propre. Différents paramétrages de la dynamique étaient pris en considération : réglage nominal et réglage 2 (cf. Tableau 1).

#### Situations unitaires

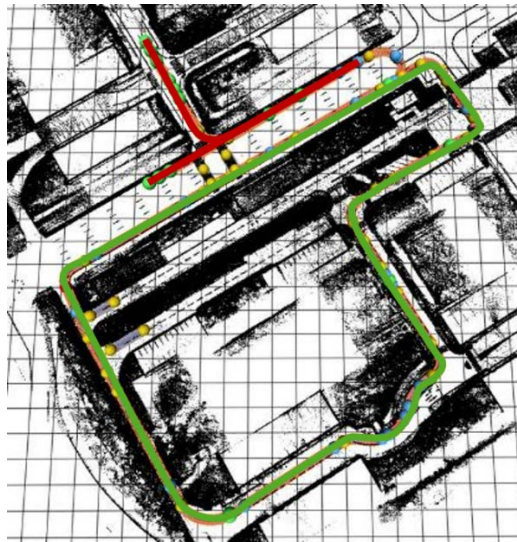
L'objectif était de tester le ressenti des personnes pour des situations spécifiques et bien contrôlées. Elles étaient constituées d'un démarrage et d'un arrêt, avec entre les deux un unique tronçon de ligne droite ou deux tronçons de ligne droite séparés par un virage de rayon de courbure fixé à 10m.

Ces essais de courte durée permettaient également d'évaluer une gamme de paramétrages de dynamique de la navette plus importante que pour les circuits. Quatre paramètres permettaient de définir la dynamique de la navette : deux relatifs à la vitesse sur les tronçons (lignes droites et éventuellement virage) et deux relatifs à l'accélération/décélération de la navette :

- La vitesse en ligne droite (Vd)
- La variation de vitesse entre ligne droite et virage ( $\Delta v$ ). La vitesse en virage (Vv) peut être obtenue à partir de Vd et  $\Delta v$  :  $Vv = Vd + \Delta v$
- L'accélération maximale de la navette définie dans le "patch" (Acc).
- La décélération maximale de la navette définie dans le "patch" (Dec).
- Les valeurs possibles de ces paramètres sont indiquées dans le Tableau 2.

Un plan expérimental complet permettant de tester l'ensemble des combinaisons de ces paramètres aurait été trop chronophage. Nous nous sommes donc concentrés sur les combinaisons de réglages les plus pertinentes définies suite à des pré-tests. Au final, 15 conditions (combinaisons de paramètres) distinctes ont été testées (cf. Tableau 2). Chacune de ces conditions était réalisée lors de l'aller puis du retour de la navette entre les stations de départ et d'arrivée pour un total de 30 essais.

Chacune de ces conditions était composée de phases de conduite distinctes et indépendantes : démarrage (D), virage (V) optionnel et freinage (F) (Figure 2).



**FIGURE 2 : CARTOGRAPHIE D'UNE PARTIE DU CIRCUIT DE TRANSPOLIS.**  
EN VERT, LE PARCOURS DE LA NAVETTE POUR LES CIRCUITS. EN ROUGE, LES TRAJETS DE LA NAVETTE DURANT LES ESSAIS UNITAIRES AVEC OU SANS VIRAGE.

**TABLEAU 2 : VARIABLE INDEPENDANTE NAVETTE**

Paramètres	Valeurs
Vitesse en ligne droite (Vd)	0,5 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 m/s
Variation de vitesse Ligne droite/Virage( $\Delta v$ )	-1 ; 0 ; +1 m/s
Accélération max (Acc)	0,3 ; 1 ; 1,5 m/s <sup>2</sup>
Décélération max (Dec)	-0,5 ; -1,5 m/s <sup>2</sup>

Nous avons également mis en place quatre essais supplémentaires nous permettant de tester le freinage d'urgence (FU) de la navette. Sur ceux-ci, afin de limiter les risques de chute les participants étaient prévenus qu'un FU allait se produire mais ils ne connaissaient pas le moment exact. Ils devaient également se tenir aux différentes poignées disponibles avec leurs deux mains.

Caractéristiques des FU :

- FU1 : Ligne droite, vitesse constante et participant en position « aller ».
- FU2 : Virage à droite, vitesse constante et participant en position « aller ».
- FU3 : Virage à gauche, vitesse constante et participant en position « retour ».
- FU4 : Ligne droite, vitesse qui augmente et participant en position « retour ».

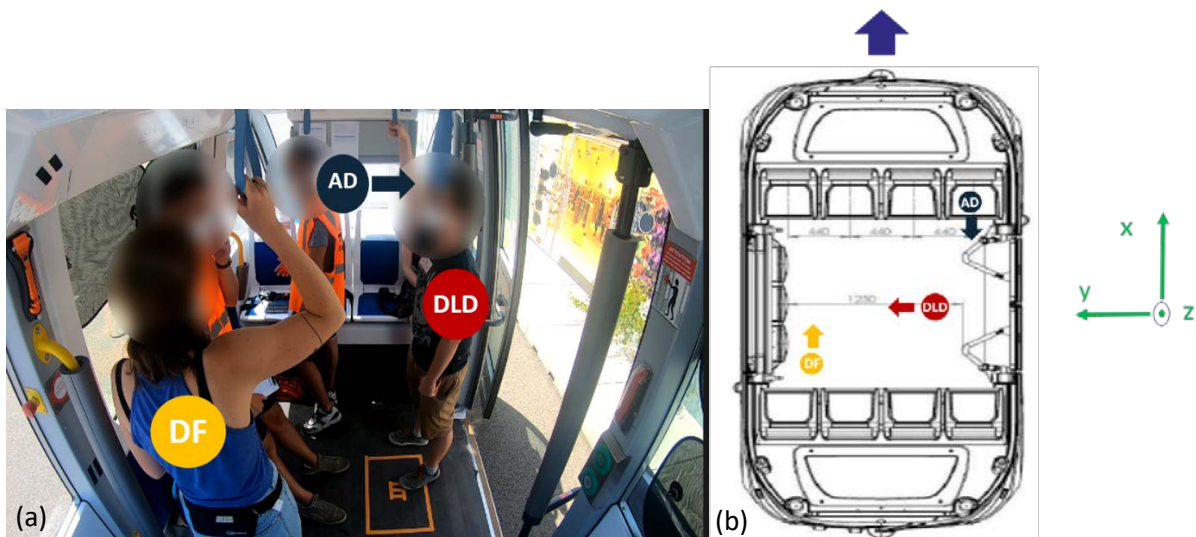
### 2.3.2. Positionnement des personnes participant à la recherche

Trois participants maximums prenaient part à chacune des sessions de tests au sein de la navette. Pour rappel, chacune des conditions étudiées était réalisée lors d'un aller et d'un retour indépendant entre deux stations. Dans la navette, les participants étaient placés selon trois positions durant l'aller (Figure 3) et trois autres durant le retour (Figure 4).

Les participants tenaient un capteur (cf. description Activ5) avec leur main gauche. De plus, ceux debout devaient se tenir par leur main droite aux poignées situées au plafond.

Positions des « Allers » de la navette

- **AD** : Assis **D**os au sens de la marche
- **DLD** : **D**ebout **L**atéralement au sens de la marche et **D**os aux portes
- **DF** : **D**ebout **F**ace au sens de la marche



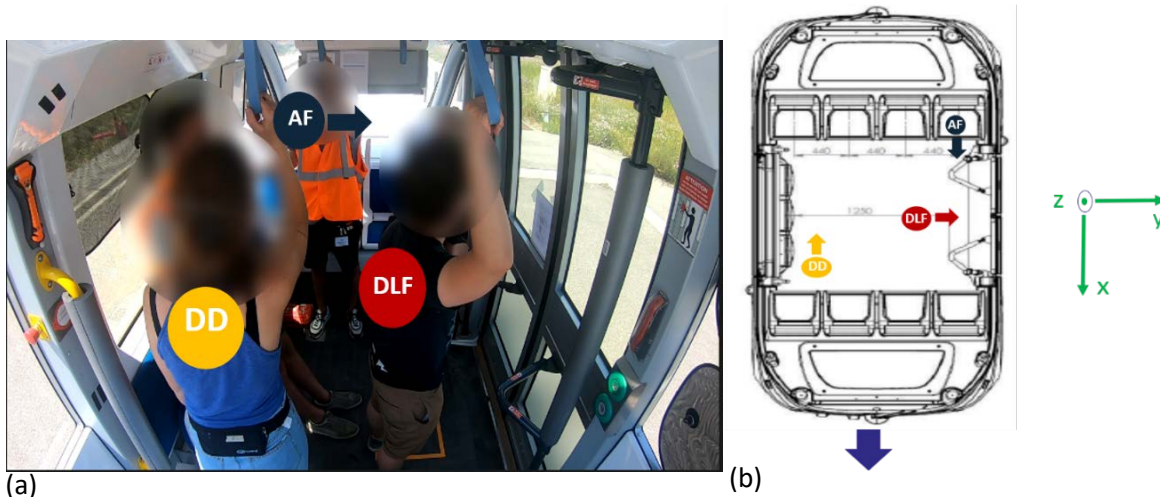
**FIGURE 3 : (A) PHOTO DE L'HABITACLE DE LA NAVETTE POUR UN « ALLER » AVEC LE NOM DES POSITIONS SUR LES PARTICIPANTS, (LE PARTICIPANT EN AD EST ASSIS DERRIERE LE PARTICIPANT EN DLD) ; (B) SCHEMA DE LA NAVETTE AVEC LE POSITIONNEMENT DES PARTICIPANTS ET AVEC → REPRESENTANT LE SENS DE MARCHÉ DE LA NAVETTE ET L'ORIENTATION DES PARTICIPANTS DURANT UN « ALLER ». EN VERT, ON RETROUVE LE REPERE GLOBAL DE L'ESSAI.**

La navette étant « symétrique », c'est-à-dire qu'elle peut se piloter, de la même manière, dans les deux sens, nous n'effectuons pas de demi-tour aux arrivées en station. De ce fait, pour le retour seul le participant « Debout Latéralement au sens de la marche » devait effectuer une rotation de 180° passant ainsi d'une position « Dos aux portes » à une position « Face aux portes ». Les deux autres participants gardaient le même positionnement mais le sens de marche de la navette étant inversé leur positionnement relatif à l'avancement de la navette était modifié (Figure 4).



## Positions des « Retours » de la navette

- **AF** : Assis Face au sens de la marche.
- **DLF** : Debout Latéralement au sens de la marche et Face aux portes.
- **DD** : Debout Dos au sens de la marche.



**FIGURE 4 : (A) PHOTO DE L'HABITACLE DE LA NAVETTE POUR UN « RETOUR » AVEC LE NOM DES POSITIONS SUR LES PARTICIPANTS, (LE PARTICIPANT EN AF ASSIS EST DERRIERE LE PARTICIPANT EN DLF) ; (B) SCHEMA DE LA NAVETTE AVEC LE POSITIONNEMENT DES PARTICIPANTS ET AVEC → REPRESENTANT LE SENS DE MARCHÉ DE LA NAVETTE ET L'ORIENTATION DES PARTICIPANTS DURANT UN « RETOUR ». EN VERT, ON RETROUVE LE REPERE GLOBAL DE L'ESSAI.**

L'enchaînement d'une même condition dans cette configuration lors d'un aller-retour avait pour objectif de tester six positions différentes avec trois participants. Ils alternaient entre ces différents couples de positions après chaque aller-retour de la manière suivante : DF/DD → AD/AF → DLD/DLF

## 2.4. OUTILS DE MESURE

### 2.4.1. Questionnaires

Utilisation de trois types de questionnaires pour la mesure du ressenti des participants.

Le questionnaire « global » (Annexe A) était à remplir en deux parties. La première, avant le début des essais, faisait référence aux connaissances et aux attentes des participants vis-à-vis de la navette. La seconde, à la suite des essais, était une évaluation globale de la navette.

Le questionnaire « circuit » (Annexe B) était à remplir après chacun des circuits. Il évaluait le ressenti des participants sur la dynamique globale de la navette durant le circuit, l'aspect sécuritaire et la pénibilité des différentes phases.

Le questionnaire « essais unitaires » (Annexe D), était quant à lui sur un format différent des précédents. Il était à remplir de manière analogique sur tablette (Samsung Galaxy Tab S6) après chaque essai unitaire. Le participant devait évaluer la pénibilité de chacune des différentes phases (D, V et F) d'un essai en lui donnant une note entre 0 et 100 tout en étant guidé par une échelle de mesure allant de « Confortable » (0) à « Extrêmement Inconfortable » (100).

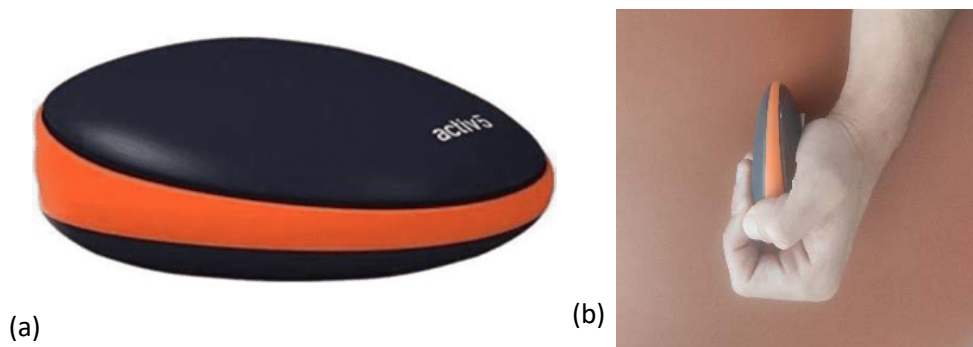
Le questionnaire « FU » (Annexe E) est une variante du questionnaire « essais unitaires ». Sur celui-ci, il n'est plus question d'évaluer le confort (FU = inconfort) mais l'acceptabilité de la situation. En effet, ces essais étaient remis dans leur contexte, c'est-à-dire que nous expliquions aux participants que ces FU pouvaient intervenir en ayant l'objectif d'éviter une collision avec d'autres usagers de la route (véhicules ou passants) pouvant ainsi sauver des vies. Il leur était donc demandé de réfléchir à la balance bénéfiques (pour les usagers extérieurs) / risques (pour les passagers dans la navette) afin d'évaluer ces FU en termes d'acceptabilité.

#### 2.4.2. EMMAPhone

L'EMMAPhone (EPH) est un smartphone (Samsung Galaxy S8) doté d'une application développée par le Laboratoire Mécanismes d'Accidents de l'UGE (LMA). Il recueille notamment les signaux des capteurs accélérométriques permettant la mesure de l'accélération linéaire dans les 3 directions ainsi que les vitesses de roulis, tangage et lacet, à une fréquence de 100 Hz. Il renvoie également les données GPS de ces smartphones (Longitude, latitude, altitude, vitesse et cap). Les participants étaient équipés de cet EMMAPhone fixé sur une ceinture afin de mesurer l'évolution de l'accélération de leur centre de masse.

#### 2.4.3. Dynamomètre à main

Les personnes tenaient dans leur main libre (gauche) un Dynamomètre à main (Activ5, ActivBody Inc., Figure 5) afin de mesurer l'évolution de leur ressenti au travers de la force de préhension. Ils avaient pour consignes de « Serrer l'Activ5 (A5) en fonction du déséquilibre/inconfort ressenti ».



**FIGURE 5 : (A) CAPTEUR DE FORCE DE PRÉHENSION : A5 ;  
(B) POSITIONNEMENT DE L'A5 DANS LA MAIN**

## 3. ANALYSES

### 3.1. TRAITEMENTS DES DONNEES

#### 3.1.1. Filtrage

Les données accélérométriques de la navette et des EPh ont été filtrées avec un filtre passe-bas Butterworth d'ordre 10 et de fréquence de coupure fixée à 5Hz.

#### 3.1.2. Synchronisation temporelle des différents capteurs

Les EPh étaient synchronisés entre eux grâce à une commande envoyée via un superviseur (Tablette tactile, Samsung Galaxy Tab S6). Dans la continuité de cette commande, ils allaient chercher simultanément le temps réel sur un serveur NTP (Network Time Protocol, [time.google.com](http://time.google.com)) avant le début de chaque essai. Les données des EPh étaient ensuite recalées temporellement grâce à cette information.

En plus des trois EPh fixés à la ceinture des participants, un quatrième EPh était fixé au plancher de la navette dans le sens longitudinal nous servant ainsi de référentiel de mesure pour la dynamique de la navette. La navette possédant seulement un horodatage interne (peu précis et variable dans le temps), nous effectuions une fonction de cross-corrélation entre les données de l'axe X de cet EPh et celui de la navette. Cette méthode nous permettait de déterminer le décalage temporel entre ces deux outils de mesure et ainsi de recalibrer les données de la navette sur le même vecteur temps NTP que les EPh.

Les données des A5 étant directement recueillies via une application développée sur les EPh, elles étaient donc synchronisées sur le temps NTP.

#### 3.1.3. Recalage spatial

Dans le but de pouvoir comparer les données de la navette (repère global) et des EPh, qui possèdent tous un repère propre fonction de la position du participant auquel ils sont rattachés, nous déterminions pour chaque essai et EPh une matrice de rotation nous permettant de les replacer dans le repère global navette (Figure 3.b et Figure 4b).

Avant le début de chaque essai, la seule accélération subie par les EPh était celle de la gravité. Nous nous servions alors des quelques secondes précédant le démarrage pour définir les paramètres de la matrice de rotation de chaque EPh pour l'axe vertical (z). Puis, lors du démarrage, l'accélération de la navette étant uniquement selon son axe longitudinal (x), nous pouvions déterminer les paramètres de chaque matrice pour cet axe. Enfin, en ayant la connaissance des paramètres des axes longitudinal (x) et vertical (z), nous pouvions calculer les paramètres des matrices pour le dernier axe, l'axe transverse (y).

#### 3.1.4. Normalisations

Un test de force maximale était réalisé avant le début de la séance dans le but de normaliser les données de l'A5. Pour ce test, les participants avaient pour consigne de serrer le plus fort possible, avec leur main gauche, l'A5. Les forces de préhensions ont ensuite été normalisées par cette force maximale.

Concernant les réponses au questionnaire « essais unitaires » (annexe D), nous avons transformé les notes, que les participants avaient données, en un Z-score. Celui-ci nous permet de normaliser les données entre les participants (contrer la variabilité inter-individuelle) et de limiter les effets de bordures (Note comprise entre 0 et 100 vs Z-score centré autour de 0).

$$\text{Z-score} = \frac{\text{Note de l'essai} - \text{moyenne des notes du participant}}{\text{écart-type des notes du participant}}$$

## 3.2. ANALYSES STATISTIQUES :

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R studio (R core team, 4.1.1 2019, Vienna, Austria).

Afin de déterminer s'il existait des relations entre dynamique du véhicule, positionnement des passagers au sein de la navette et inconfort ressenti via le questionnaire « essais unitaires », les phases D, V et F ont été considérées comme indépendante.

Un test de Shapiro-Wilk ainsi qu'un test de Bartlett ont été utilisés pour vérifier la normalité des données et l'homogénéité des variances. Lorsque la normalité des données et l'homogénéité des variances étaient respectées une Anova suivi d'un test post-hoc de Tukey (HSD) étaient utilisés. Dans le cas contraire, le test de Kruskal-Wallis puis le test post-hoc de Wilcoxon et la méthode des moindres carrés avec correction de Holm étaient menés. La p-value était considérée comme significative pour p-value < 0,05.

L'analyse statistique a été effectuée en plusieurs étapes. Premièrement, l'effet de la position a été étudié pour chacune des phases en prenant en compte une condition nominale (Vd fixé à 3 m/s, Vv fixé à 2 m/s et le reg 1 d'Acc/Dec ; cige condition : Vd3-Vv2-reg1). Puis, sur cette même condition pour analyser l'influence de la phase, nous avons comparé les résultats de chacune de ces phases.

Dans un second temps nous avons pris en compte les conditions avec le reg1 (nominal Navya) afin d'évaluer l'influence de la vitesse.

Puis dans un troisième temps, l'ensemble des conditions (tous réglages confondus) ont été prises en compte dans l'analyse afin d'estimer l'effet des paramétrages d'Acc/Dec.

## 4. RESULTATS

Dans ce livrable seule une partie des analyses sera présentée :

- Le ressenti global des passagers par rapport à la navette.
- Une première analyse des dynamiques de navette (répétabilité, comparaison aux consignes).
- Le ressenti des passagers exprimé via les questionnaires en fonction des situations (dynamiques théoriques de la navette, trajets considérés, positionnements dans la navette, ...).

### 4.1. REACTION FACE A LA NAVETTE

#### 4.1.1. Ressenti global

##### Questionnaire global (annexe A) :

Connaissance vis-à-vis des navettes autonomes avant l'expérimentation :

- 96% prennent les transports en commun plusieurs fois par mois
- 91 % savent en quoi consiste une navette autonome
- 17% sont déjà montés dans une navette autonome
- 91% n'ont pas d'appréhension à monter dans une navette autonome

##### Retour et avis sur la navette suite à l'expérimentation :

- Classement des positions les plus inconfortables :  
 $AD < AF < DL < DF < DD$
- 87 % se sont sentis en sécurité dans la navette
- Les participants lui ont donné une note de  $6.7 \pm 1.3$  en termes de sécurité (10 étant parfaitement sécuritaire)
- 52% ne trouvent pas la navette plus dangereuse que les transports en commun classique
- 61% aimeraient, à l'avenir, prendre cette navette comme transport en commun
- 70 % la recommanderaient à un proche

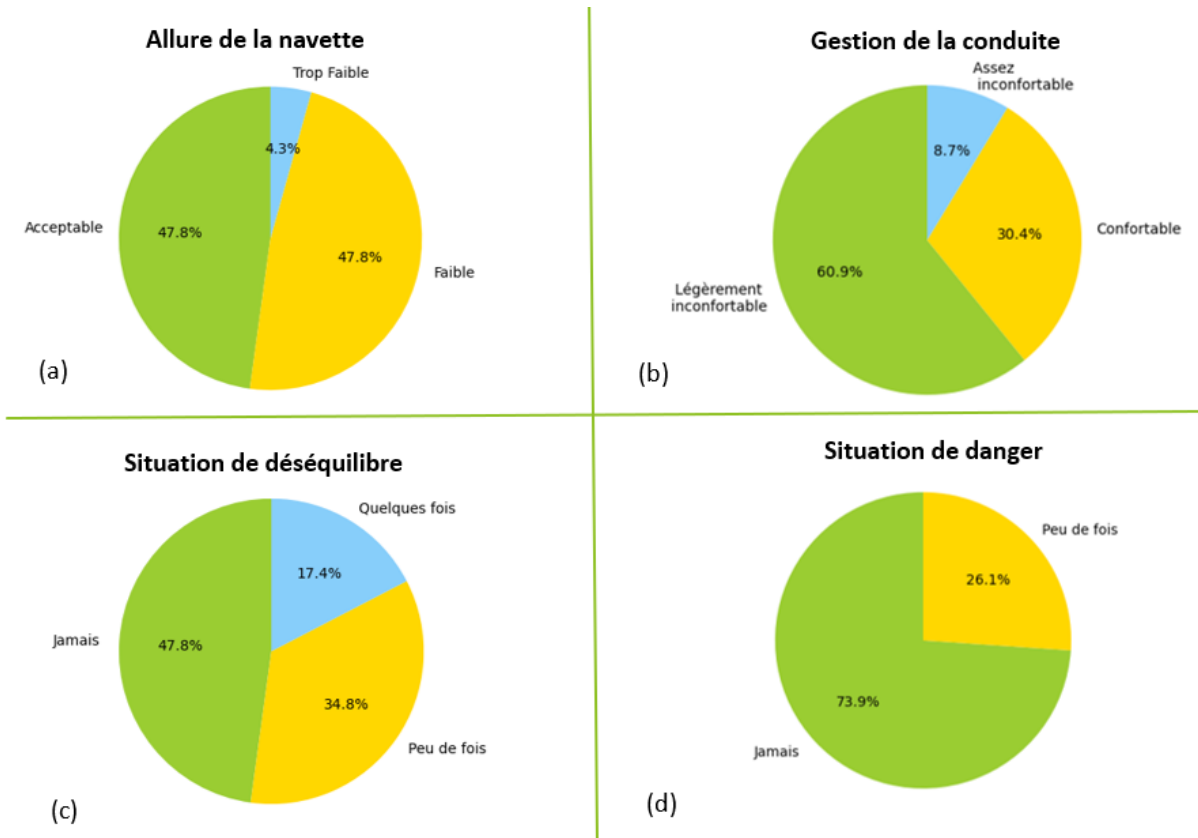
Dans cette étude, nous avons des participants assez jeunes (moyenne d'âge à 25 ans). Ceux-ci, ayant l'habitude de prendre les transports en commun et étant familiarisés avec les nouvelles technologies, n'ont pour la grande majorité aucune appréhension à monter dans une navette autonome malgré que ce soit pour eux une découverte. Nous sommes conscients que ce biais de recrutement peut avoir un effet sur les résultats présentés dans ce livrable.

Dans sa globalité, les participants ont trouvé la navette sécuritaire. Le premier résultat intéressant, dans les réponses à ce questionnaire, est que les participants ont classé les positions debout comme celles engendrant le plus d'inconfort.

La probable influence de la position du participant sur le niveau d'inconfort ressenti pourra être analysé plus en détail dans la partie 4.3.

#### 4.1.2. Analyse du ressenti lors du circuit (réglage nominal)

Les réponses ci-dessous proviennent du questionnaire « circuit » (Annexe B)



**FIGURE 5 : REPARTITION DES REPONSES DES PARTICIPANTS AU QUESTIONNAIRE « CIRCUIT » POUR UN REGLAGE NOMINAL.**

Pénibilité des différentes phases de conduite :

### Démarrage < Virage < Freinage

Note de satisfaction global de l'essai :

7/10

Le réglage nominal Navya est celui avec lequel la navette est commercialisée et mise en circulation. Sur ce réglage, la moitié des participants trouve que l'allure de la navette est faible (Figure 6.a). Quant à la gestion de la conduite, qui fait ici référence aux enchaînements des différentes phases d'accélération, de virage et de freinage, elle entraîne un léger niveau d'inconfort chez une majorité de passagers (Figure 6.b). Cela peut se traduire par l'apparition de situations de déséquilibre ressenties par la moitié des participants sur ce circuit (Figure 6.c).

La mise en évidence de situations de danger (Figure 6.d) chez un quart des participants peut s'expliquer par l'occurrence de freinages intempestifs voir d'urgence (non programmés) lors de quelques passations. En effet, ces freinages imprévus engendrent des perturbations bien plus importantes que lors d'une passation sur circuit sans incident. Nous ne connaissons pas l'origine de ces freinages (ni obstacle sur la trajectoire de la navette ni problème technique détecté).

Les participants devaient également classer les phases de conduite (Démarrage ; virage ; freinage) de la plus confortable à la plus inconfortable. La phase D se détache très clairement comme celle engendrant le moins d'inconfort. 73% d'entre eux l'ont classé comme phase la plus confortable.

En globalité, nous pouvons définir ce circuit comme acceptable, lorsqu'il n'y a pas de freinages violents intempestifs, mais certaines situations (ex : pénibilité des phases de conduite) apparaissent comme étant plus délicates et nécessitent d'être approfondies via l'étude des réponses à l'évaluation des essais nominaux.

### 4.1.3. Analyse du ressenti lors du circuit (réglage 2)

À la suite de ce premier circuit avec un réglage nominal, nous avons voulu tester un deuxième réglage des paramètres d'Acc/Dec. Nous avons choisi le reg2 avec l'objectif de pouvoir augmenter les performances de la navette sans pour autant rendre sa dynamique trop inconfortable.

Les réponses ci-dessous proviennent du questionnaire « circuit » (Annexe B)

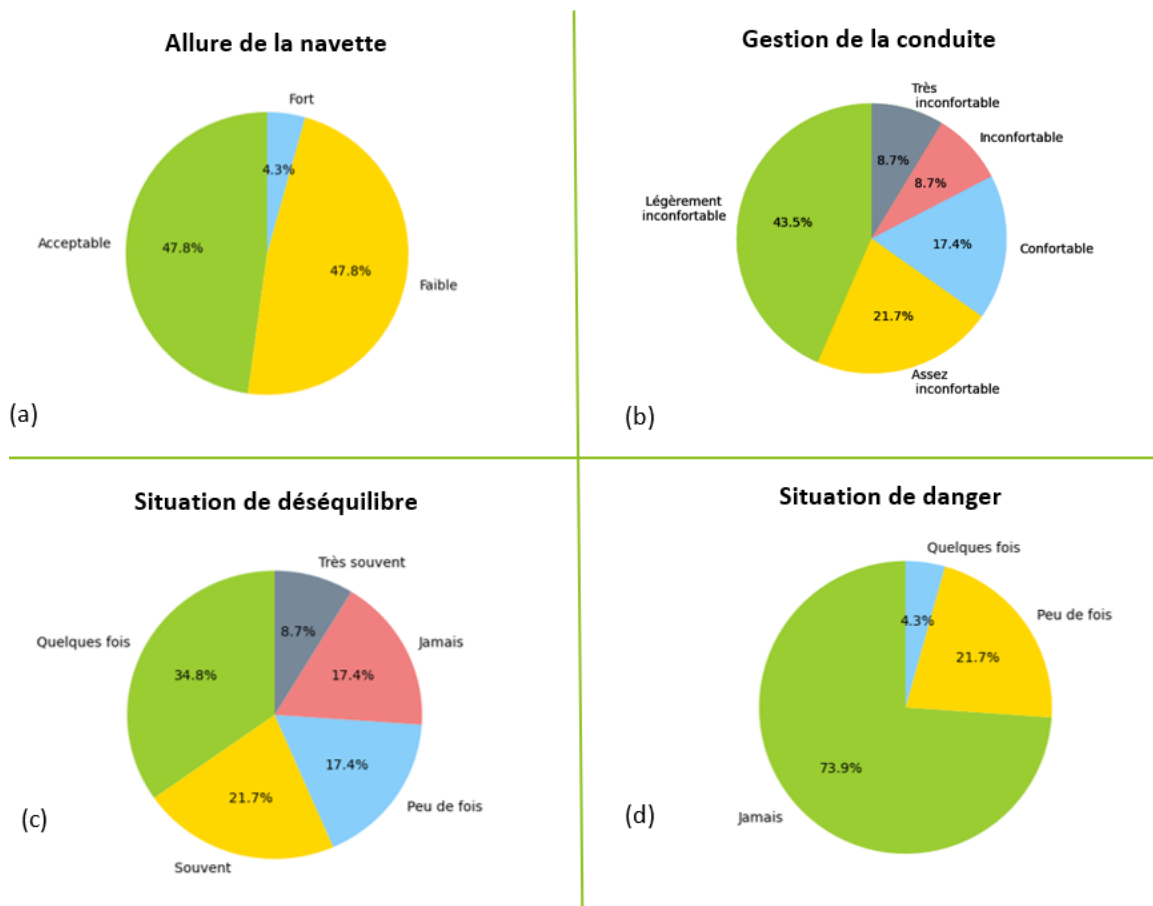


FIGURE 6 : REPARTITION DES REPONSES DES PARTICIPANTS AU QUESTIONNAIRE « CIRCUIT » POUR

Pénibilité des différentes phases de conduite :

**Démarrage < Virage & Freinage**

Note de satisfaction global de l'essai :

**6/10**



Avec ce réglage, la moitié des participants trouve toujours que l'allure de la navette reste faible (Figure 7.a). Quant à la gestion de la conduite, elle entraîne cette fois-ci un niveau d'inconfort plus important pour plus d'un tiers des passagers (Figure 7.b). Cela se traduit par l'augmentation des situations de déséquilibre ressenti (Figure 7.c).

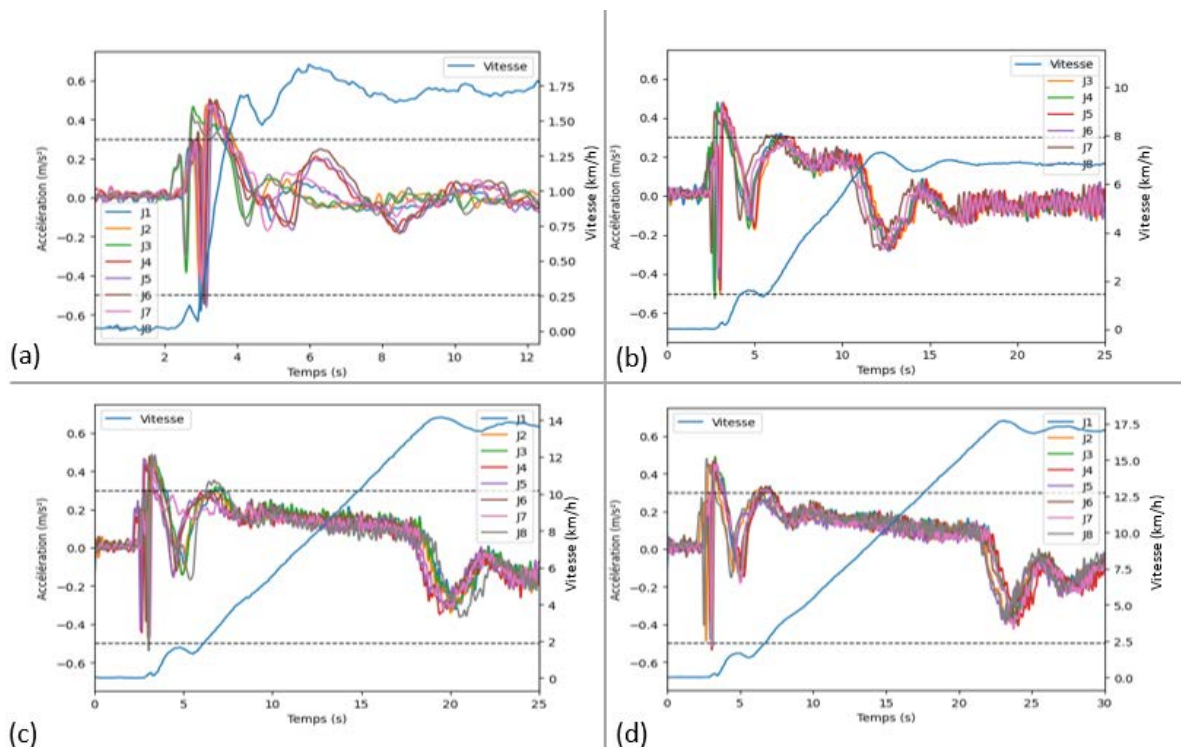
En revanche les situations de danger (Figure 7.d) ressenties par les participants ont peu évolué entre les deux réglages du circuit. En effet, nous pensons que ces situations sont liées aux freinages imprévus, qui sont également apparu durant le circuit pour ce réglage, et non à la dynamique de la navette.

Concernant le classement des phases de conduite, la phase D se détache toujours comme celle engendrant le moins d'inconfort mais plus que 54% d'entre eux l'ont classé comme phase la plus confortable. Même si la note de satisfaction globale est égale à 6/10, le niveau d'inconfort général a augmenté comparé au réglage nominal.

## 4.2. DYNAMIQUE DE LA NAVETTE LORS DES ESSAIS UNITAIRES

Dans un premier temps, la dynamique de la navette, en réponse aux différents réglages implémentés, est présentée. Nous nous intéressons notamment à la répétabilité des profils d'accélération entre sessions de tests, à la forme générale de ces profils et au respect des consignes (accélération/décélération, vitesses, ...).

La Figure 8 représente les accélérations longitudinales observées sur les 8 sessions de tests lors du démarrage pour quatre consignes de vitesses, et pour un objectif d'accélération nominal ( $Acc=0,3 \text{ m/s}^2$ ). Les profils ont été recalés temporellement afin que le début de l'accélération intervienne après 2 secondes.



**FIGURE 7 : ACCELERATION LONGITUDINALE DE LA NAVETTE AU DEMARRAGE POUR QUATRE CONSIGNES DE VITESSE (A : 0.5 M/S ; B : 2 M/S ; C : 4 M/S ; D : 5 M/S) EN REG1 (OBJECTIF D'ACCELERATION  $Acc=0,3 \text{ m/s}^2$  ;  $Dec=0,5 \text{ m/s}^2$ ) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS.**

**LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**



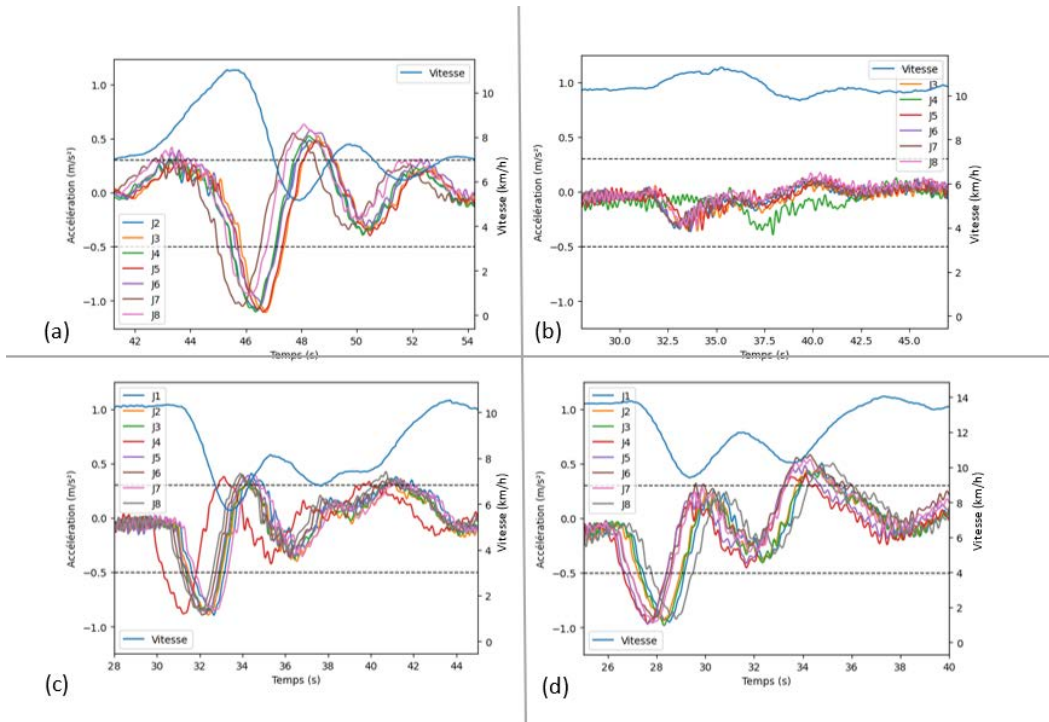
On observe que les profils d'accélération sont répétables entre essais. Ils sont notamment constitués d'une phase de montée en accélération, d'un plateau d'accélération puis d'un retour vers un régime avec une accélération nulle lorsque la consigne de vitesse est atteinte.

Les plateaux d'accélération sont relativement stables, et leur durée dépend logiquement de la consigne de vitesse. Pour une consigne de vitesse très faible (0,5 m/s), le plateau devient inexistant. En moyenne, l'accélération lors de ces plateaux est inférieure à la consigne : environ  $0,2 \text{ m/s}^2$  alors que la consigne est  $\text{Acc} = 0,3 \text{ m/s}^2$ .

Les phases transitoires de montée en accélération et de retour à un régime établi sont elles aussi répétables mais présentent des profils beaucoup plus complexes. Lors de la montée en accélération, un premier pic de décélération, court mais brutal, intervient systématiquement dans la première seconde de montée en accélération. La transition entre la phase de montée en accélération et le plateau est marquée par une oscillation importante : un premier pic au-delà de la consigne, une accélération nulle voire négative puis un deuxième pic avant d'atteindre le plateau d'accélération. Ces oscillations ont un effet visible sur les profils de vitesse et sont de nature à engendrer des perturbations d'équilibre. Si l'on excepte le premier pic brutal de décélération, les Jerks lors de la phase de montée en accélération semblent maîtrisés avec des valeurs entre  $0,5 \text{ m/s}^3$  et  $1 \text{ m/s}^3$ .

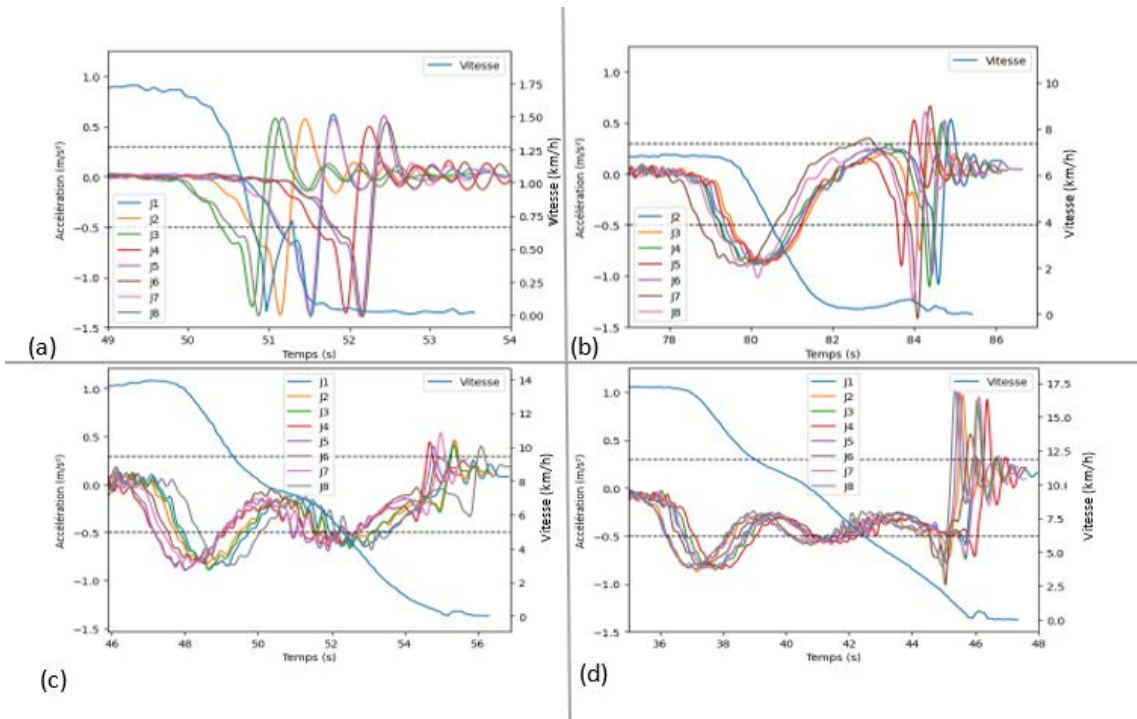
Lors de la transition avec le régime établi, on constate des oscillations de vitesse, et donc d'accélération, avant de se stabiliser autour de la vitesse de consigne. Les oscillations d'accélération sont relativement importantes, avec notamment des décélérations aussi importantes, voire plus, que les consignes d'accélération. Là encore, ce dépassement de vitesse de consigne et les oscillations qui en découlent sont de nature à perturber l'équilibre des passagers.

Lors des virages, on observe aussi de légères variations de vitesses longitudinales, même lorsque la consigne de vitesse en virage et en ligne droite sont les mêmes (cf. Figure 9.b). Les accélérations associées ne sont pas complètement négligeables (proches des accélérations observées lors du démarrage). Lorsque les consignes impliquent des vitesses différentes entre lignes droite et virages (e.g. ralentissement avant un virage, Figure 9.c et 9.d) les accélérations induites sont importantes et oscillantes. La vitesse dans le virage est assez peu stable et les consignes de décélérations sont largement dépassées :  $1 \text{ m/s}^2$  alors que la consigne est  $\text{Dec} = 0,5 \text{ m/s}^2$ . Ces phénomènes sont néanmoins très reproductibles entre essais.



**FIGURE 8 : ACCELERATION LONGITUDINALE DE LA NAVETTE PENDANT LE VIRAGE POUR QUATRE CONSIGNES DE VITESSE EN LIGNE DROITE ET VIRAGE ( A :  $V_D = 2 \text{ m/s}$  &  $V_V = 3 \text{ m/s}$ ; B :  $V_D = 3 \text{ m/s}$  &  $V_V = 3 \text{ m/s}$ ; C :  $V_D = 3 \text{ m/s}$  &  $V_V = 2 \text{ m/s}$ ; D :  $V_D = 4 \text{ m/s}$  &  $V_V = 3 \text{ m/s}$ ) EN REG1 (OBJECTIF D'ACCELERATION  $ACC=0,3 \text{ m/s}^2$  ;  $DEC=0,5 \text{ m/s}^2$ ) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS.**

**LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**



**FIGURE 9 : ACCELERATION LONGITUDINALE DE LA NAVETTE AU FREINAGE POUR QUATRE CONSIGNES DE VITESSE ( A :  $0,5 \text{ m/s}$  ; B :  $2 \text{ m/s}$  ; C :  $4 \text{ m/s}$  ; D :  $5 \text{ m/s}$ ) EN REG1 (OBJECTIF D'ACCELERATION  $ACC=0,3 \text{ m/s}^2$  ;  $DEC=0,5 \text{ m/s}^2$ ) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS.**

**LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**

Les profils d'accélération longitudinales lors des phases de décélérations sont présentés à la Figure 10. Les décalages temporels observés proviennent des légères variations de vitesse au cours de l'essai et du fait que le recalage temporel est effectué sur le démarrage de la navette. La répétabilité des profils est néanmoins aussi importante que lors des phases de démarrage.

Tout comme le démarrage, le freinage est constitué d'une phase de "montée" en décélération, de plateau et de retour à une accélération nulle. Un premier pic de décélération est visible à la transition entre la phase de "montée" et le plateau. Ce pic dépasse la consigne de décélération (environ  $0,8 \text{ m/s}^2$  pour une consigne  $\text{Dec}=0,5 \text{ m/s}^2$ ). Les Jerks sont néanmoins maîtrisés lors de cette phase. En revanche, la phase d'arrêt est marquée par des Jerks très importants, et un « rebond » de la vitesse au moment de l'arrêt de la navette entraînant un pic d'accélération opposé au mouvement. D'après les sensations ressenties au sein de la navette ce pic pourrait être d'origine mécanique (relâchement des freins et des suspensions). Lorsque les réglages de dynamiques (Acc / Dec) sont modifiés via le "patch", les observations sont sensiblement les mêmes.

Les mêmes figures pour les combinaisons de réglages reg2 et reg3 figurent en annexe C. Concernant le reg2, la consigne d'Acc à  $1\text{ms/s}^2$  est respectée durant les phases de démarrage (annexe C-Figure 30) et de virage (annexe C-Figure 31) par contre elle entraîne des « overshoots » plus importants au niveau de la vitesse ce qui engendre des décélérations compensatrices aussi importantes, voire plus, que la consigne de Dec. Pour le reg3, la consigne d'Acc/Dec à  $1.5\text{ms/s}^2$  est respectée pour la phase de démarrage bien que le phénomène « d'overshoot », la décélération compensatrice et les variations de vitesse initiale soient plus largement amplifiés (annexe C-Figure 33). En phase de virage, la consigne de Dec est dépassée pour la condition avec un différentiel de vitesse positif (annexe C-Figure 34). Pour la phase de freinage, la consigne de Dec est largement dépassée et la consigne d'Acc est atteinte au moment du « rebond » (annexe C-Figure 35).

Pour conclure, on observe une bonne répétabilité des profils d'accélération longitudinale entre les essais. Cependant la forme de ces profils n'est pas idéale, notamment lors des phases de transition (démarrage, freinage, passage entre ligne droite et virage avec variation de vitesse) : on observe des oscillations importantes avec des consignes d'accélération / décélération qui sont parfois dépassées.

### 4.3. ANALYSE DU RESENTI LORS DES ESSAIS UNITAIRES

De nombreux facteurs peuvent influencer les notes de ressenti exprimées par les passagers via les questionnaires. Certains sont contrôlés dans l'expérimentation, tels que les paramètres définissant la dynamique de la navette (vitesse de consigne en ligne droite  $V_d$ , variation de vitesse entre ligne droite et virage  $\Delta V$ , consignes d'accélération Acc et décélération Dec), la position des passagers dans la navette (assis de face AF ou de dos AD à la marche, debout de face DF ou de dos DD à la marche, debout de côté vers l'intérieur DLF ou l'extérieur du virage DLD) et la phase (démarrage D, virage V et freinage F). D'autres facteurs sont non contrôlés, en particulier la variabilité inter-individuelle.

Afin de simplifier l'interprétation des résultats, l'analyse de ces données a donc été réalisée indépendamment pour chacune des trois phases (D, V, F), et en plusieurs étapes :

- Étape 1 : observation globale des notes de ressenti.
- Étape 2 : étude de l'influence de la position des passagers et de la phase sur les notes de ressenti normalisées pour des réglages de vitesse et de dynamique nominaux.
- Étape 3 : étude de la vitesse de la navette sur les notes de ressenti normalisées pour des réglages de dynamique nominaux.
- Étape 4 : étude de l'influence des consignes d'accélération/décélération sur les notes de ressenti normalisées.

### 4.3.1. Observation globale des notes de ressenti

La Figure 11 présente la note moyenne donnée par les participants en fonction de leur position et de la phase pour toutes les conditions de vitesse et réglage dynamique confondues.

On peut noter en premier lieu que les valeurs de ces notes restent, heureusement, dans des niveaux raisonnables : en dessous de 20 ("légèrement inconfortable") pour la plupart des configurations. Ce ressenti augmente cependant pour certaines situations, au-dessus de ce premier seuil pour les passagers debout lors des phases de freinage et virage. On remarque que la note moyenne est plus élevée pour les phases de freinage (F : vert) et de virage (V : bleu) que pour la phase de démarrage (D : rouge). Sur ce graphique, on peut également se rendre compte que le niveau d'inconfort semble être influencé par la position des participants. De manière descriptive, nous observons des similitudes avec les premiers résultats présentés dans le questionnaire « global » (cf. Chapitre 4.1 : des positions plus contraignantes que d'autres) et du questionnaire « circuit » (cf. Chapitre 4.2 : des phases plus contraignantes que d'autres).

On peut aussi observer une assez forte variabilité nous incitant à : 1) analyser plus en détail l'influence des différents paramètres de dynamique de la navette ; 2) travailler sur des notes de ressenti normalisées par sujets (utilisation du Z-score, cf. Chapitre 3.1.4) pour limiter la variabilité inter-individuelle. C'est l'objet des paragraphes suivants.

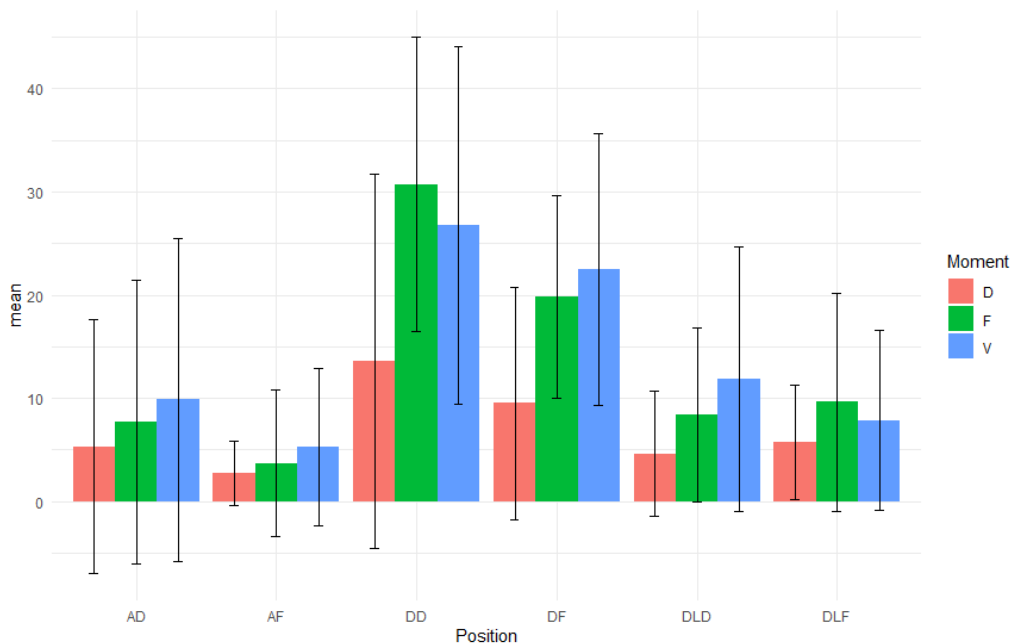


FIGURE 10 : NOTE MOYENNE ± ECART TYPE EN FONCTION DU POSITIONNEMENT ET DE LA PHASE TOUTES CONDITIONS CONFONDUES

### 4.3.2. Influence de la position des passagers et de la phase pour des réglages de vitesse et de dynamique nominaux

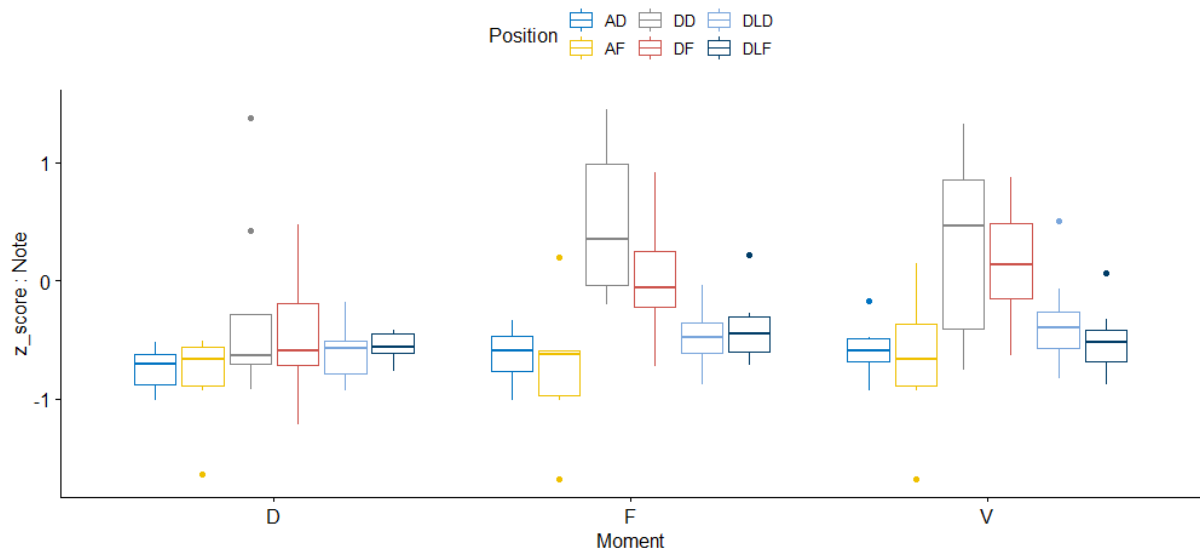
Dans cette partie, nous analysons les notes de ressenti normalisées (Z-score) pour la condition nominale ( $V_d : 3\text{m/s}$  ;  $\Delta v : -1\text{m/s}$  ;  $\text{Acc}=0,3\text{ m/s}^2$ ,  $\text{Dec} = 0,5\text{ m/s}^2$ ).

#### Principaux résultats

Les notes de ressenti normalisées (Z-score) pour chaque phase et position dans la navette sont présentées à la Figure 12 sous forme de "boîtes à moustaches" (médiane, premier et troisième quartile, point aberrants).

L'analyse statistique est détaillée dans la section suivante. Les principaux résultats qui en ressortent sont :

- Pas de différence majeure entre les positions lors du démarrage (ressenti globalement très faible).
- L'inconfort/déséquilibre perçu augmente pour les positions debout face et dos à la route (DF et DD) lors des virages et des freinages.
- L'inconfort/déséquilibre perçu augmente pour les phases de V et F par rapport à D



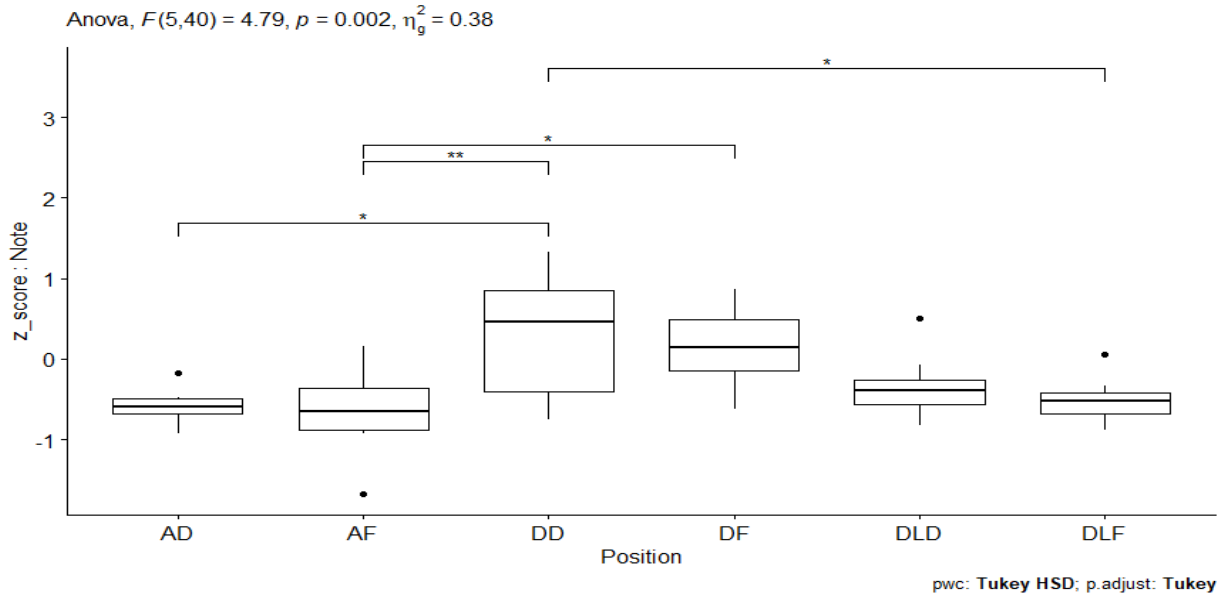
**FIGURE 11 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA PHASE ET DE LA POSITION POUR LA CONDITION NOMINALE.**

### ***Analyses statistiques***

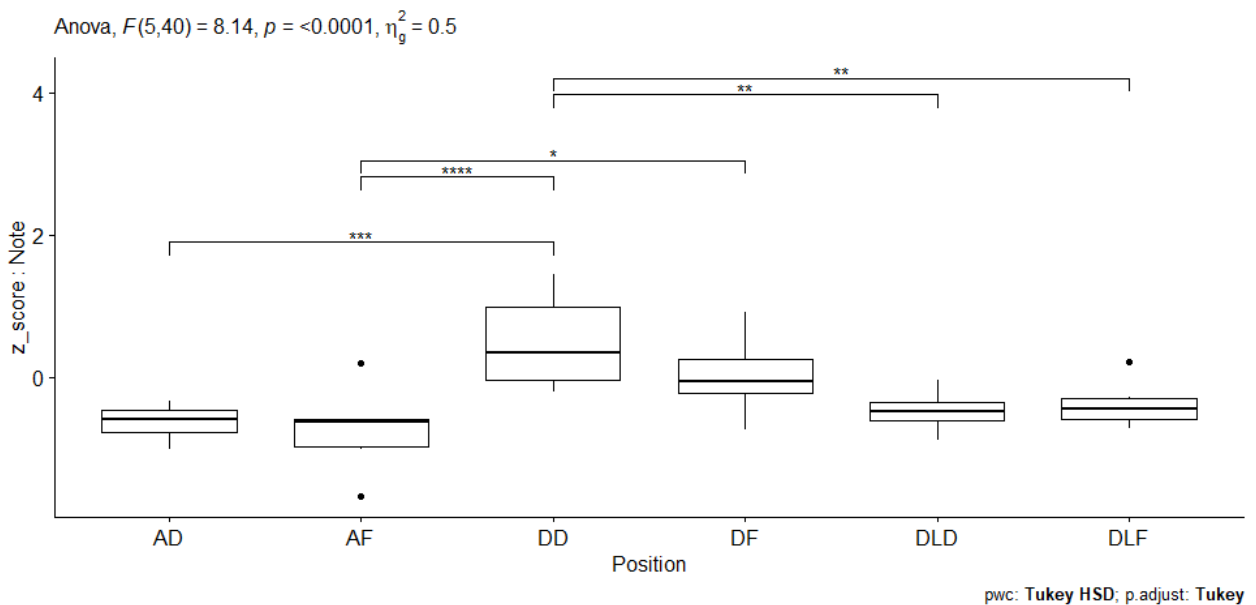
#### Influence de la position sur le ressenti des participants

Dans ce cas de figure, les données suivaient la loi normale et les groupes (ici chacune des positions) possédaient une homogénéité des variances. Nous avons donc mené une Anova à un facteur pour évaluer l'influence de la position sur le ressenti des passagers. L'analyse statistique a démontré une influence de la position sur le ressenti de l'inconfort des passagers pour les phases de conduite V ( $F(5,40) = 4.79$ ,  $p\text{-value} < 0.01$ ) et F ( $F(5,40) = 8.14$ ,  $p\text{-value} < 0.0001$ ). Pas d'effet significatif détecté de la position pour la phase D. Le test post-hoc révèle pour le virage (Figure 13) que la position DD est plus contraignante que les positions assises (AD & AF) et DLF et que DF l'est plus que AF. Concernant le freinage (Figure 14), DD est plus contraignante que les autres positions hormis DF et que celle-ci est là aussi plus contraignante que AF.

Les positions DD et DF apportent un niveau d'inconfort plus important comparées aux autres positions. Ce résultat est en accord avec le classement des positions fait par les participants via le questionnaire « global » (cf. Chapitre 4.1).



**FIGURE 12 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA POSITION POUR UNE CONDITION NOMINALE EN PHASE DE VIRAGE.**  
 (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)

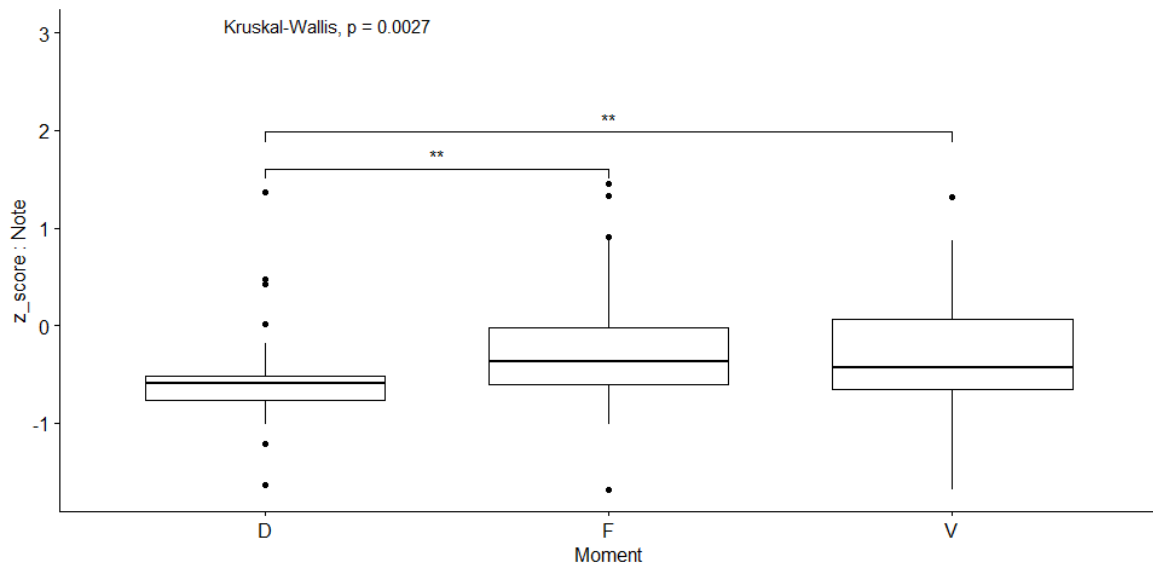


**FIGURE 13 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA POSITION POUR UNE CONDITION NOMINALE EN PHASE DE FREINAGE.**  
 (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)

#### Influence de la phase sur le ressenti des participants

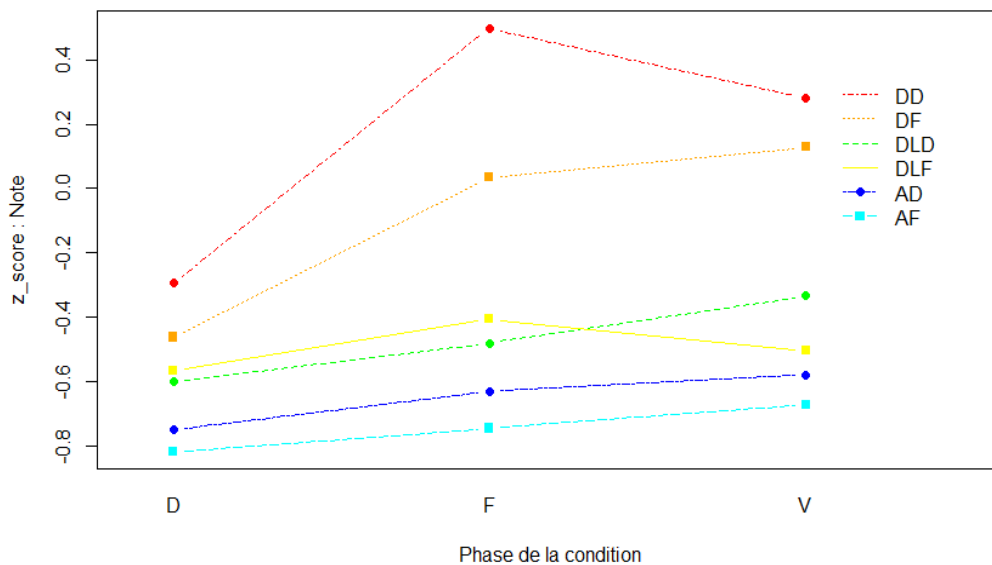
Nous avons également comparé les phases entre elles pour mettre en avant l'influence de celles-ci. Dans cette situation, les données ne suivant pas la loi normale nous avons utilisé le test de Kruskal-Wallis qui nous a révélé, comme précédemment, l'influence significative de la position (chi-squared = 31.563, df = 5, p-value < 0.0001), mais aussi de la phase (chi-squared = 11.858, df = 2, p-value < 0.01) et une interaction entre ces deux paramètres (chi-squared = 50.155, df = 17, p-value < 0.0001).

Le test de Wilcoxon a révélé qu'il existe des différences significatives entre les phases D vs F et D vs V (Figure 15). L'influence significative de la phase vient appuyer l'analyse descriptive faite sur la Figure 11 ainsi que les réponses au questionnaire « circuit » des participants (cf. Chapitre 4.1.2). En effet, les phases F et V procurent plus d'inconfort que la phase D.



**FIGURE 14 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA PHASE POUR LA CONDITION NOMINALE. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

La Figure 16, nous montre une augmentation du Z-score entre la phase D et celles du F et V principalement pour les positions DD et DF. La comparaison par paires à l'aide du test Emmeans avec correction de Holm révèle une interaction significative pour les positions DD entre les phases D vs F (p-value < 0.01) et D vs V (p-value < 0.05) et DF entre D vs V (p-value < 0.05).



**FIGURE 15 : ÉVOLUTION DU Z-SCORE EN FONCTION DE LA PHASE POUR CHACUNE DES POSITIONS.**

### 4.3.3. Influence de la vitesse consigne pour des dynamiques nominales

#### Principaux résultats

L'analyse statistique est détaillée dans la section suivante. Les principaux résultats qui en ressortent sont :

- La vitesse de la navette n'a pas d'influence sur le déséquilibre ressenti lors des phases de démarrage et de freinage.
- La vitesse en virage ( $V_v = V_d + \Delta v$ ) et la variation de vitesse  $\Delta v$  entre virage et ligne droite augmente le ressenti d'inconfort/déséquilibre pour tous les passagers debout (DF, DD, DLF, DLD).

#### Analyses statistiques

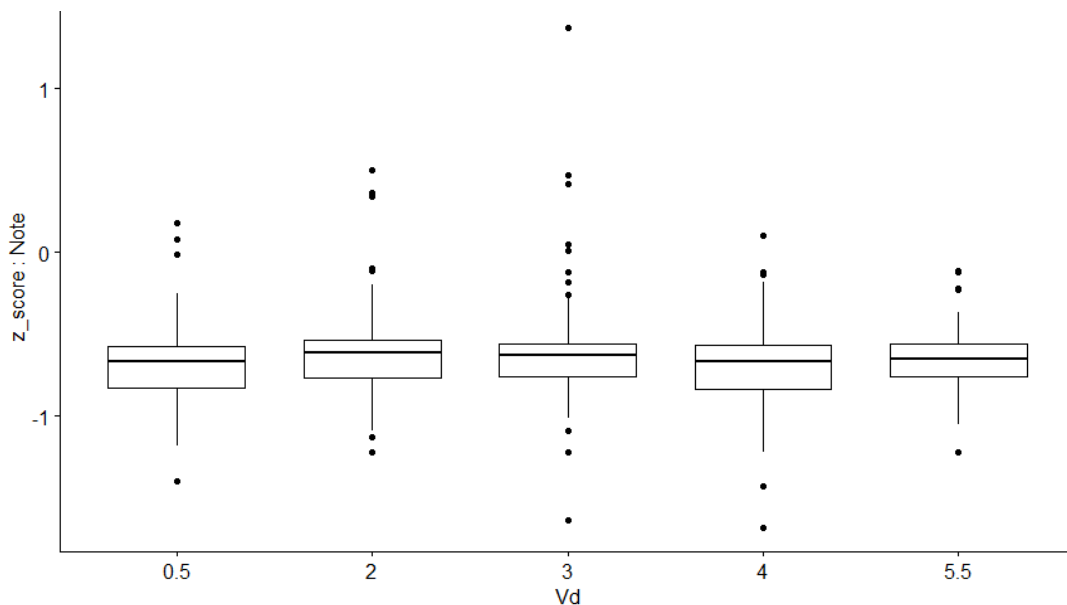
##### Influence de la vitesse en ligne droite sur le ressenti des participants

Les données ne suivant pas la loi normale nous avons effectué un test de Kruskal-Wallis pour déterminer l'influence de ce paramètre.

Le test ne révèle pas d'influence significative de la vitesse (chi-squared = 5.3908, df = 4, p-value > 0.05) pour la phase de démarrage (Figure 17).

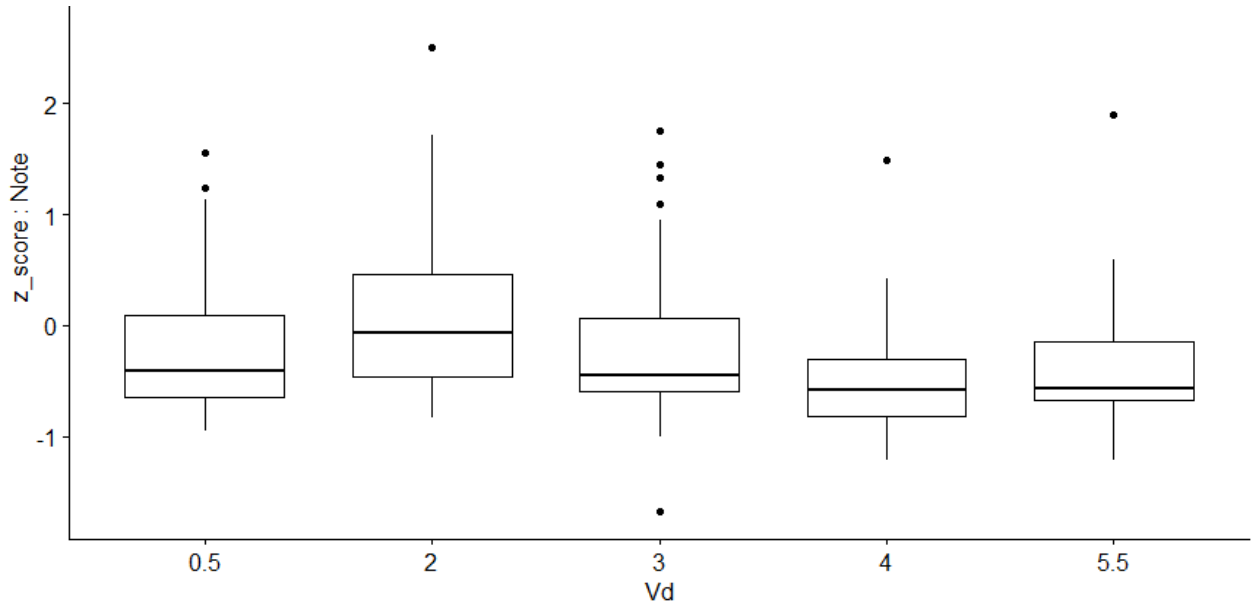
Concernant le freinage, l'analyse ne révèle pas une influence claire de la vitesse (Figure 18). Nous avons donc fait un modèle linéaire prenant en compte le z-score en fonction de la vitesse et de la position. Celui-ci ne révèle pas d'influence de la vitesse sur le ressenti des passagers (p-value > 0.05).

La consigne de vitesse en ligne droite ( $V_d$ ) ne se révèle pas comme un paramètre influençant le ressenti des passagers pour les phases de D et F.



**FIGURE 16 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA VITESSE CONSIGNE EN LIGNE DROITE EN PHASE DE DEMARRAGE POUR LE REG1. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

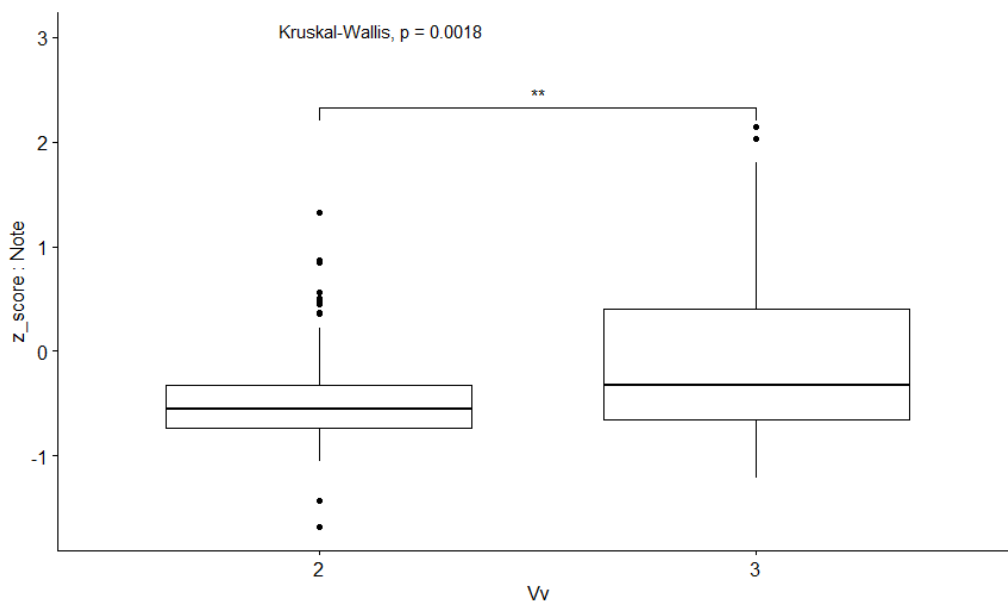




**FIGURE 17 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA VITESSE CONSIGNE EN LIGNE DROITE EN PHASE DE FREINAGE POUR LE REG1. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

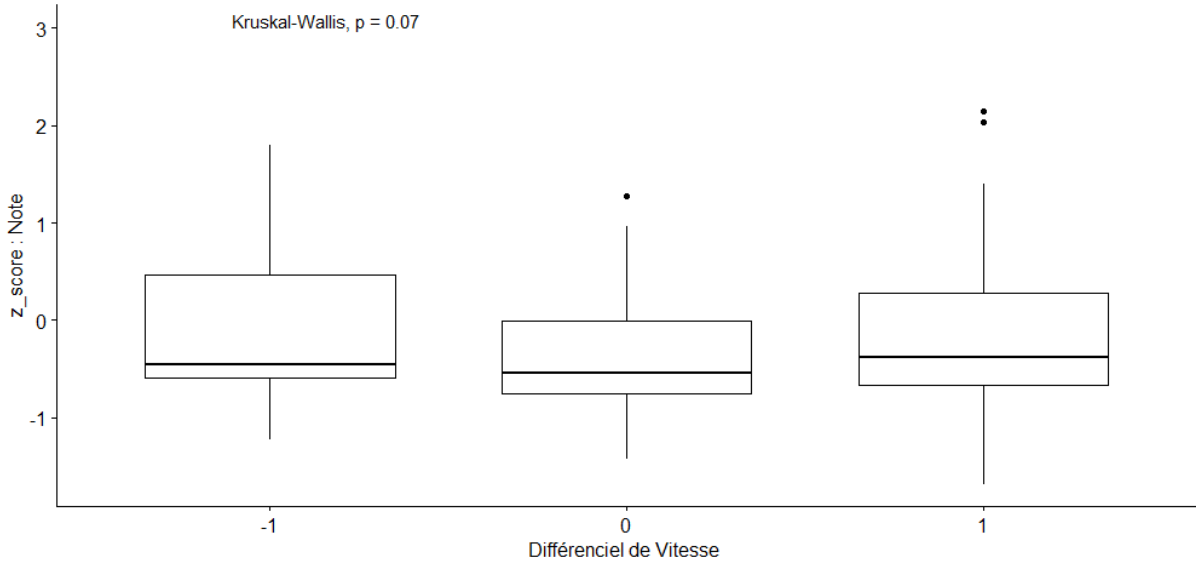
#### Influence de la vitesse en virage sur le ressenti des participants

Concernant la phase V, nous avons pris en compte, dans l'analyse, la consigne de vitesse en virage (Vv) et non la consigne de vitesse en ligne droite (Vd). De ce fait, l'analyse révèle une influence de la Vv sur le z-score (chi-squared = 9.7823, df = 1, p-value < 0.01). La Vv à 3 m/s entraîne un niveau d'inconfort chez les participants plus élevé que la Vv à 2 m/s (Figure 19).



**FIGURE 18 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA VITESSE CONSIGNE EN VIRAGE POUR LE REG1. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

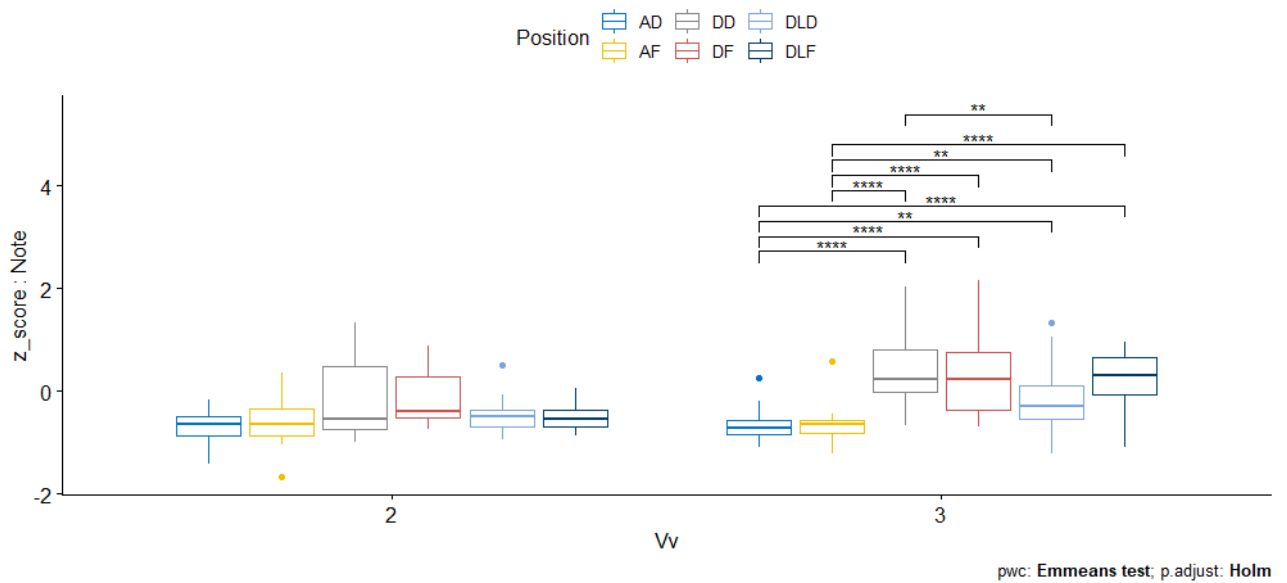
Lorsque l'on prend en compte le différentiel de vitesse, l'analyse statistique ne révèle pas d'influence significative sur la note (chi-squared = 5.3148, df = 2, p-value = 0.07). On observe, malgré une absence de significativité statistique, que le différentiel de vitesse nul entraîne un z-score inférieur (Figure 20).



**FIGURE 19 : Z-SCORE EN FONCTION DU DIFFERENTIEL DE VITESSE POUR LE REG1. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

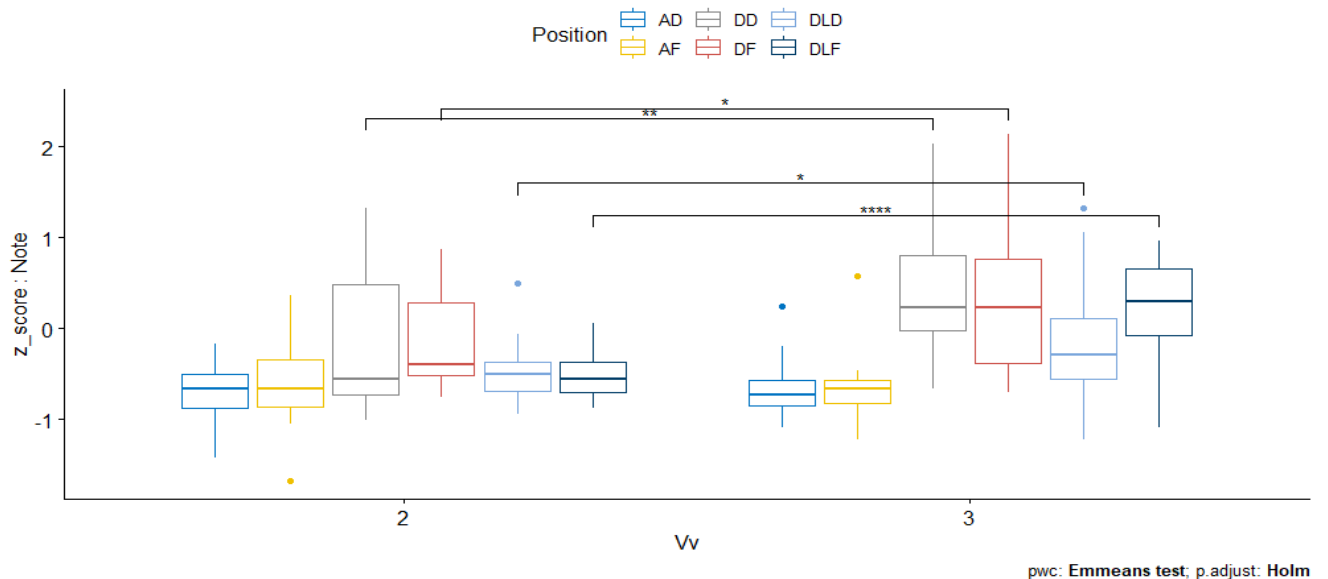
#### Influence de la position sur le ressenti des participants en virage

Dans cette configuration, l'influence significative de la position des participants (chi-squared = 70.385, df = 5, p-value < 0.0001) est révélée sur la Figure 21. Les positions debout sont significativement plus contraignantes que celles assises pour la Vv à 3m/s. On remarque que les positions debout latérales deviennent significativement différentes des positions assises, ce qui n'était pas le cas dans la première analyse. La seconde différence est que nous ne retrouvons pas de différence significative entre les positions pour la Vv à 2m/s alors que nous en trouvions dans l'analyse de la condition nominale (VD : 3m/s ; Vv : 2m/s ; reg1, cf. Chapitre 4.3.2). Pour rappel, dans cette analyse d'autres conditions avec un différentiel de vitesse inégal (ex : VD : 2m/s ; Vv : 2m/s ; reg1) sont prises en compte. Cependant, nous n'avons pas pu faire un plan expérimental complet et nous n'avons donc pas de condition avec un différentiel de vitesse négatif pour la vitesse à 2 m/s alors que celui-ci possède un z-score plus élevé (Figure 21).



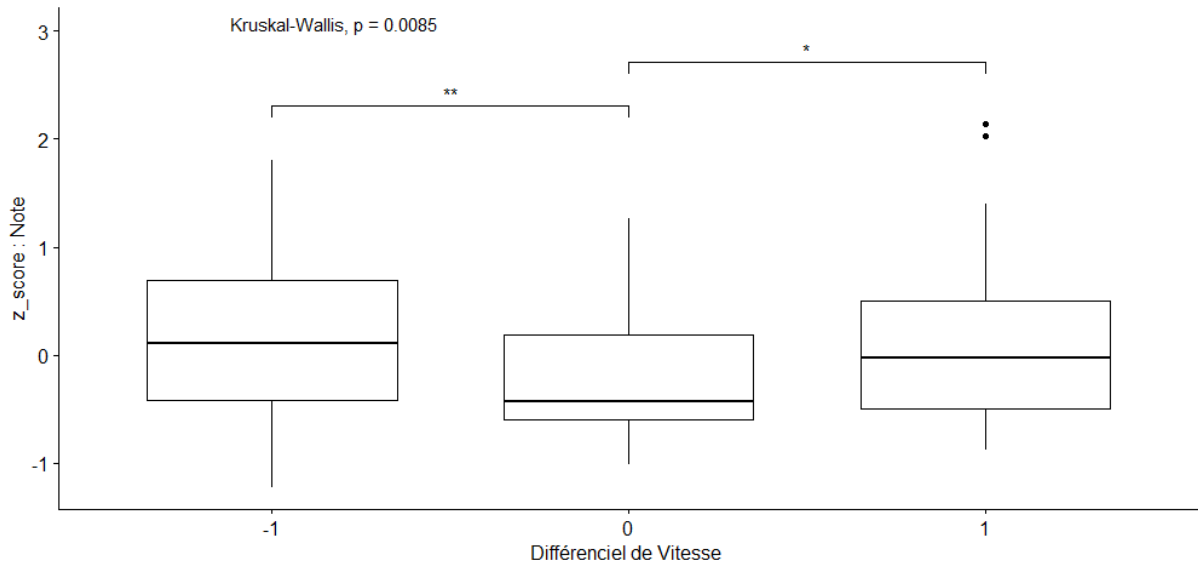
**FIGURE 20 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA VITESSE CONSIGNE EN VIRAGE ET DE LA POSITION EN REG1. EFFET DE LA POSITION (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

Sur la Figure 22, on peut remarquer que les positions assises ne sont pas influencées par la Vv. Nous avons décidé d'effectuer une nouvelle analyse en les retirant du traitement afin de voir si nous pouvions révéler une influence du différentiel de vitesse.



**FIGURE 21 : Z-SCORE EN FONCTION DE LA VITESSE CONSIGNE EN VIRAGE ET DE LA POSITION EN REG1. INTERACTION ENTRE VITESSE CONSIGNE EN VIRAGE ET POSITION (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

En prenant en compte seulement les positions debout, l'analyse statistique révèle une influence significative du différentiel de vitesse sur l'inconfort ressenti par les passagers (chi-squared = 9.5268, df = 2, p-value < 0.01). On remarque que le ressenti des passagers est meilleur lorsqu'il n'y a pas de différence entre les Vd et les Vv (différentiel de vitesse ( $\Delta v$ ) = 0 m/s, Figure 23).



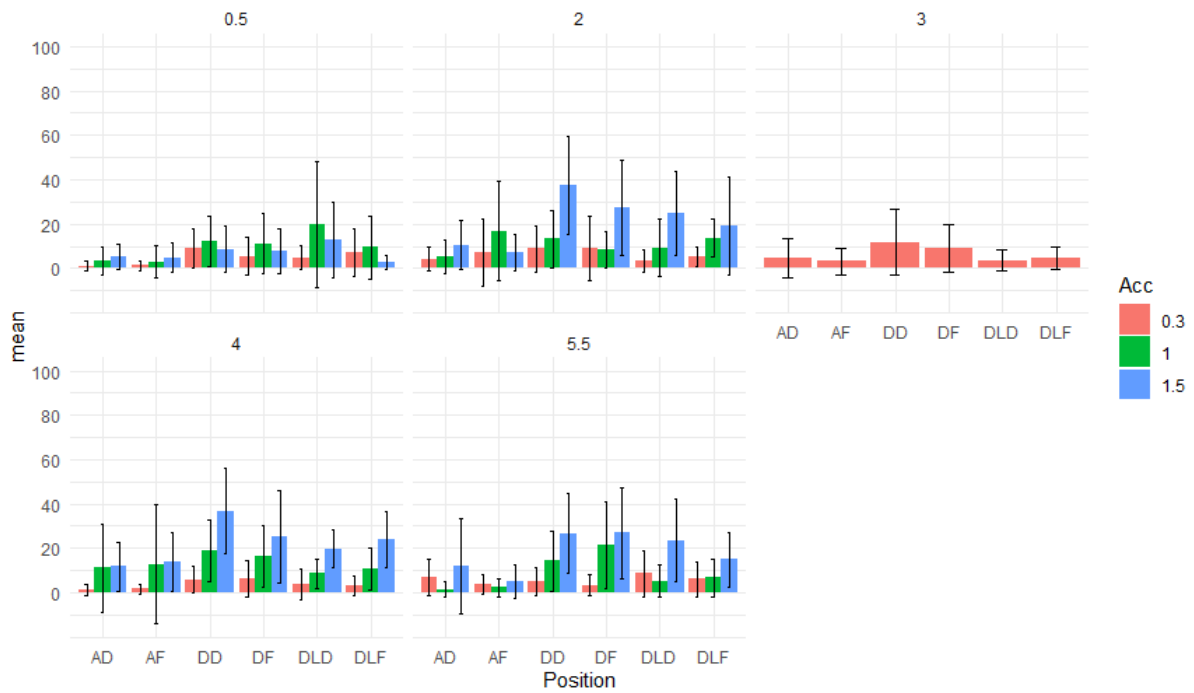
**FIGURE 22 : Z-SCORE EN FONCTION DU DIFFERENTIEL DE VITESSE EN PRENANT EN COMPTE SEULEMENT LES POSITIONS DEBOUT DES CONDITIONS AVEC LE REG1. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

#### 4.3.4. Influence des consignes d'accélération/décélération sur les notes de ressenti

Les notes de ressenti pour les différents réglages de dynamique sont présentée sur les Figure 24 et Figure 25 pour les phases de démarrage et freinage respectivement.

L'analyse statistique est détaillée dans la section suivante. Les principaux résultats qui en ressortent sont :

- La confirmation des résultats précédents concernant l'effet des phases (F & V > D), de la position des passagers (DD, DF > DLD, DLF, AD, AF) et de la vitesse de consigne (sans effet hormis en virage) pour les différents réglages de dynamique.
- L'augmentation des consignes de dynamique augmente globalement le ressenti de d'inconfort/déséquilibre. Celui-ci devient même critique dans certaines configurations : pour Dec=1.5 m/s<sup>2</sup>, les notes de ressenti dépassent le troisième seuil (Note = 60 correspondant à « Inconfortable » pour les positions debout).
- Cependant, une augmentation de la consigne d'accélération à 1m/s<sup>2</sup> n'affecte que légèrement le ressenti lors du démarrage, mais le dégrade nettement pour la phase de virage.
- Le différentiel de vitesse nul est le moins contraignant tandis que le différentiel de vitesse négatif se démarque comme étant le plus inconfortable.



**FIGURE 23 : NOTE MOYENNE DES PARTICIPANTS EN FONCTION DE LA POSITION ET DU REGLAGE D'ACC POUR CHACUNE DES VITESSES CONSIGNES EN LIGNE DROITE EN PHASE DE DEMARRAGE.**



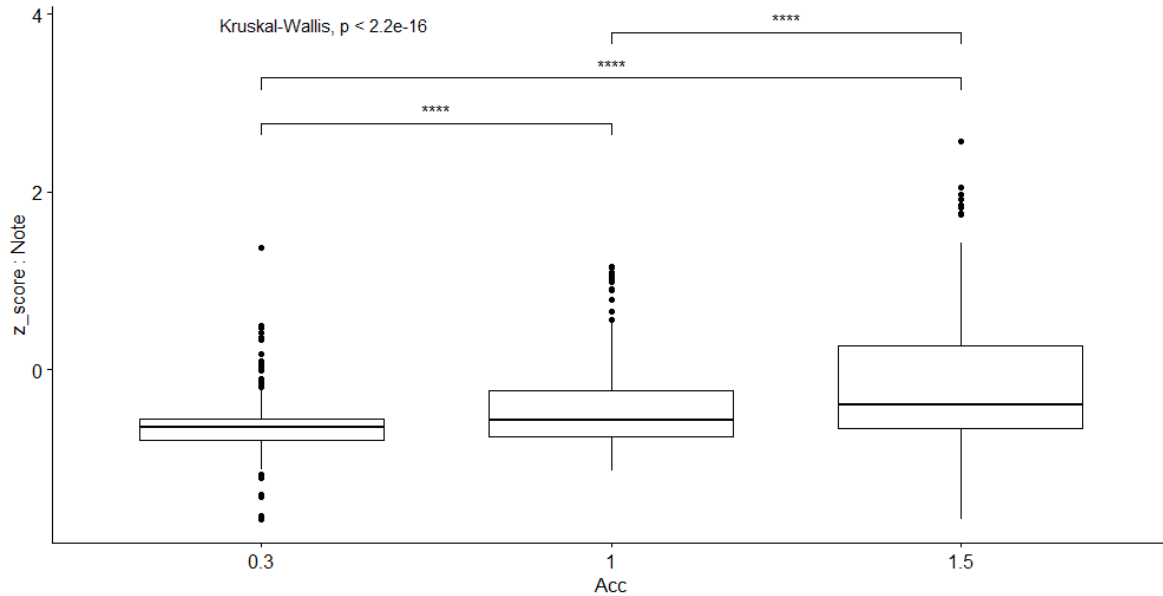
**FIGURE 24 : NOTE MOYENNE DES PARTICIPANTS EN FONCTION DE LA POSITION ET DU REGLAGE DE DEC POUR CHACUNE DES VITESSES CONSIGNES EN LIGNE DROITE EN PHASE DE FREINAGE.**

### Analyse statistique détaillée

#### Influence des niveaux de consigne d'accélération/décélération sur le ressenti des participants :

Les données ne suivant pas la loi normale, nous avons effectué des tests de Kruskal-Wallis pour déterminer l'influence de ces paramètres. Ces tests ont mis en avant l'influence significative des paramètres d'Acc/Dec sur le ressenti des passagers sur chacune des phases.

Pour la phase D (chi-squared = 78.157, df = 2, p-value < 2.2e-16), le test de Wilcoxon révèle une différence entre chacun des niveaux d'Acc (Figure 26).

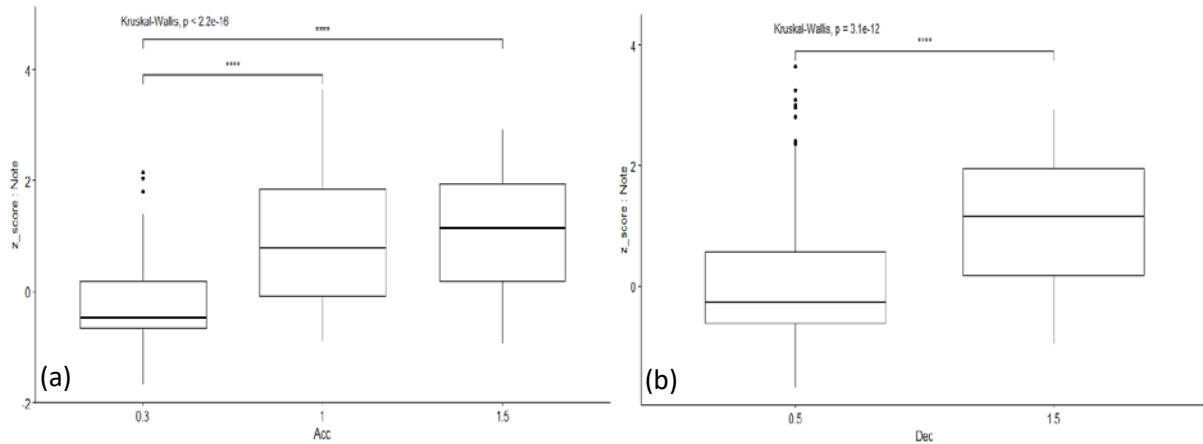


**FIGURE 25 : Z-SCORE EN FONCTION DU REGLAGE D'ACCELERATION EN PHASE DE DEMARRAGE. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

Le réglage nominal est celui procurant le moins d'inconfort au démarrage. Lorsque nous augmentons la consigne d'Acc, nous augmentons le niveau d'inconfort ressenti (Figure 26). Cependant, on observe que pour le réglage d'Acc à 1m/s<sup>2</sup> la note moyenne ne dépasse jamais le premier seuil (Note = 20) correspondant à « Légèrement inconfortable » (Figure 24).

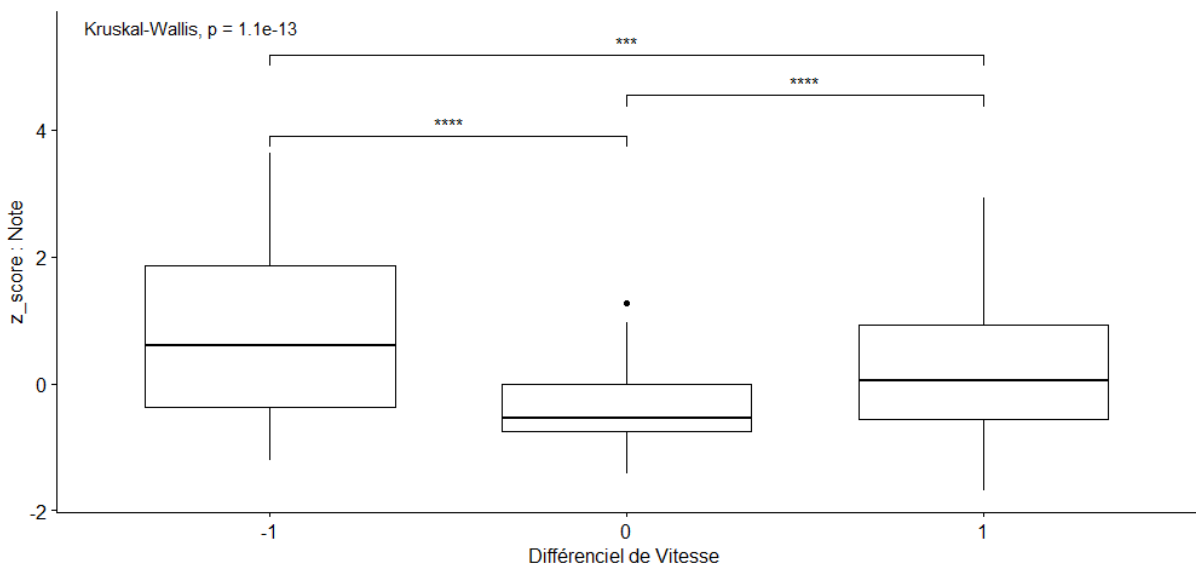
Concernant la phase V, les deux paramètres (Acc/Dec) sont à prendre en compte. En effet, nous avons mis en place des conditions avec un différentiel de vitesse en virage négatif (-1m/s) avec accélération, positif (+1m/s) avec décélération ou sans différentiel de vitesse.

Le test de Kruskal-Wallis a révélé une influence significative pour le paramètre d'Acc (chi-squared = 117.7, df = 2, p-value < 2.2e-16) et de Dec (chi-squared = 48.602, df = 1, p-value < 0.0001). Le test de Wilcoxon révèle une différence entre le niveau d'Acc nominal Navya et les deux autres (Figure 27.a) et entre les deux niveaux de Dec (Figure 27.b).



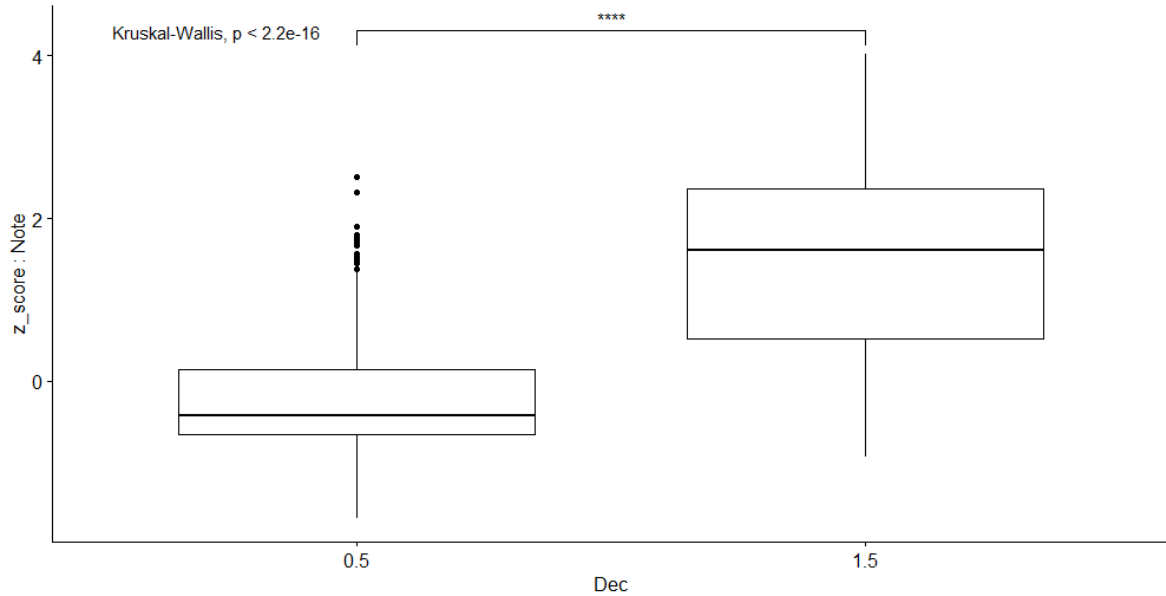
**FIGURE 26 : Z-SCORE EN FONCTION DU REGLAGE D'ACCELERATION (A) ET DE DECELERATION (B) EN PHASE DE VIRAGE. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

Dans ce cas de figure, en prenant en compte l'ensemble des conditions et sans exclure de position, le test de Kruskal-wallis révèle également un effet significatif du différentiel de vitesse (chi-squared = 59.658, df = 2, p-value < 0.0001). Le test de Wilcoxon révèle une différence significative entre chacun des différentiels de vitesse. (Figure 28). Cette influence du différentiel de vitesse est plus marquée que lors de l'analyse avec seulement le réglage d'Acc/Dec nominal. Le différentiel de vitesse négatif se démarque comme étant le plus inconfortable.



**FIGURE 27 : Z-SCORE EN FONCTION DU DIFFERENTIEL DE VITESSE EN PRENANT EN COMPTE L'ENSEMBLE DES CONDITIONS. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

Pour le freinage, en prenant en compte le paramètre de Dec (chi-squared = 236.35, df = 1, p-value < 2.2e-16), le test de Wilcoxon a révélé une différence significative entre les deux niveaux de Dec (Figure 29).



**FIGURE 28 : Z-SCORE EN FONCTION DU REGLAGE DE DECELERATION EN PHASE DE FREINAGE. (\* : P-VALUES < 0.05 ; \*\* : P-VALUES < 0.01 ; \*\*\* : P-VALUES < 0.001 ; \*\*\*\* : P-VALUES < 0.0001)**

Comme nous avons pu le voir précédemment (cf. Figure 24 et Figure 25), la phase F en reg1 entraîne un inconfort plus important que la phase D. En effet, on observe que la note moyenne des positions debout pour la phase F approche voire dépasse le premier seuil (Note = 20 → « Légèrement inconfortable, Figure 25).

Concernant le reg3 (réglage de Dec max à 1.5 m/s<sup>2</sup>), il produit un niveau d'inconfort beaucoup plus important en dépassant le troisième seuil (Note = 60) correspondant à « Inconfortable » pour les positions debout et au moins le premier pour les positions assises (Figure 25).



## 5. BILAN ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de la tâche T3.3 est d'évaluer le ressenti des passagers de la navette en termes d'inconfort postural et de déséquilibre lors de scénarios contrôlés sur pistes d'essais fermées.

Les objectifs secondaires sont :

- L'identification des dynamiques les plus pénalisantes pour les passagers ;
- Le développement d'une méthodologie de quantification du déséquilibre et de l'inconfort ressenti à l'aide de capteurs inertiels embarqués.

Ainsi dans ce premier livrable, nous nous sommes concentrés sur l'étude du ressenti des participants via les réponses aux différents questionnaires pour des situations avec un réglage nominal et modifié.

### 5.1. PRINCIPAUX RESULTATS

Les expérimentations menées sur pistes ont permis d'évaluer le ressenti - en termes d'inconfort ou déséquilibre induit par la dynamique de la navette - pour 23 participants, répartis sur 8 sessions d'essais, lors de différentes situations contrôlées. Une partie de cette base de données est analysée dans ce livrable.

#### 5.1.1. Ressenti global

La navette a été globalement perçue comme sécuritaire par les passagers. Néanmoins, on observe des différences de perception selon la situation : les positions debout engendrent un inconfort/déséquilibre plus important, tandis que les démarrages sont moins inconfortables que les autres phases (virages et freinages).

Lors des circuits, l'allure de la navette a été jugée trop faible. Néanmoins, la majorité des passagers ont ressenti des situations de déséquilibre au cours de ces circuits, et certains freinages violents intempestifs et inexplicables ont amené un quart des passagers à ressentir des situations de danger. L'augmentation de la consigne d'accélération de la navette (circuit 2) n'améliore pas la sensation d'allure trop faible mais augmente les déséquilibres et inconforts perçus.

Il faut évidemment garder à l'esprit les biais de cette évaluation : essais sur piste fermées et non sur site réel, biais de recrutement (population jeune et technophile), biais de situation (participants à une expérimentation scientifique et non simple usager), etc. Il serait donc intéressant de compléter ces observations lors d'une campagne en exploitation sur l'un des sites expérimentaux du projet.

#### 5.1.2. Profils d'accélération de la navette lors des essais unitaires

L'étude des profils d'accélération longitudinaux lors des essais unitaires a montré que ces dynamiques sont très répétables, mais qu'elles présentent certaines irrégularités notamment lors des phases de transition (démarrage, freinage, passage entre ligne droite et virage avec variation de vitesse) : on observe des oscillations importantes avec des consignes d'accélération / décélération qui sont parfois dépassées. De plus, plus les consignes de dynamiques (réglages d'accélération et décélération via le "patch") sont importantes, plus ces "défauts" sont présents et importants. Ces variations pourraient être responsables d'une partie du ressenti d'inconfort et du déséquilibre des passagers. Il serait donc important d'étudier plus en détail la relation entre la dynamique exacte de la navette et le ressenti des passagers. Cette étude sera l'objet d'un prochain livrable.

### 5.1.3. Étude du ressenti lors des essais unitaires

Nous avons pu mettre en avant plusieurs situations et/ou paramètres qui avaient une influence potentielle sur le ressenti des passagers.

Les analyses ont révélé que **les positions debout sont les plus inconfortables**. Pour l'ensemble des conditions, les positions debout de dos ou de face au sens de la marche de la navette autonome (DD & DF) sont les plus pénalisantes. Pour les situations de virage, une vitesse en virage ( $V_v$ ) plus importante entraîne également un niveau d'inconfort ressenti plus élevé pour les positions debout latérales (DLD & DLF). Ces résultats s'expliquent naturellement par la stabilité de ces postures par rapport aux perturbations : la posture assise est évidemment la plus stable, les postures debout sont moins stables dans la direction antéro-postérieure, qui est la direction de l'accélération longitudinale, prépondérante au démarrage et au freinage mais aussi présente en virage, pour les postures DF et DF, et celle de l'accélération centrifuge (prépondérante en virage) pour les postures DLF et DLD.

On a pu également remarquer que les phases de conduite (D, V et F) n'engendrent pas le même niveau d'inconfort. En effet, **la phase de démarrage (D) apparaît comme étant la moins pénalisante pour les passagers** et ce quels que soient les réglages testés. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que cette phase est "anticipable" (fermeture des portes par exemple). Sa dynamique, bien qu'imparfaite (cf. Chapitre 4.2), reste aussi plus simple que celle des phases de virage (accélération longitudinale oscillante et centrifuge) ou de freinage (rebond de vitesse parfois important).

**Il ressort que la vitesse n'est pas un paramètre influençant le ressenti des passagers en termes d'inconfort pour les phases D et F.** En revanche, celle-ci est à prendre en compte pour la phase V (accélération centrifuge). On a pu également observer que les situations avec **un différentiel de vitesse nul entre ligne droite et virage engendrent un niveau d'inconfort plus faible**.

Enfin, nous avons pu montrer que **l'augmentation des consignes de dynamiques (Acc et Dec) augmente le niveau d'inconfort ressenti**. Seul le réglage d'Acc à 1 m/s pour la phase de démarrage ne semble pas entraîner une augmentation de l'inconfort préoccupante. En effet, sur ce réglage la note moyenne des participants, pour l'ensemble des positions, restait en dessous du premier seuil correspondant à « légèrement inconfortable ».

## 5.2. LIMITATIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude n'est qu'une première analyse, forcément incomplète, de la base de données expérimentale. Notamment, ce livrable ne présente pas l'étude des situations de freinage d'urgence. De même, nous avons utilisé une approche très globale consistant à évaluer la relation entre les paramètres théoriques définissant une condition d'essai et le ressenti exprimé a posteriori par les sujets. Le lien entre les caractéristiques réelles de la situation (notamment la dynamique temporelle de la navette) et le ressenti des passagers reste à faire. Il serait aussi intéressant d'essayer d'exploiter d'autres mesures du ressenti, plus immédiates, telles que les forces exercées sur les capteurs de préhension. Ce sera l'objet du prochain livrable.

L'une des caractéristiques temporelles importantes que nous n'avons pas pu évaluer de manière contrôlée dans cette étude est le Jerk (dérivée temporelle de l'accélération). Cette variable est en effet reconnue comme étant un facteur important du déséquilibre et du risque de chute et a l'avantage de n'affecter qu'à la marge les performances dynamiques de la navette (temps de montée en vitesse, distance de freinage). C'est une limite forte de cette étude, liée à l'impossibilité d'ajuster le Jerk sur la navette Navya et à la répétabilité des profils temporels d'accélération (les Jerks sont donc très similaires entre les essais).

Enfin, il faut garder à l'esprit que ces essais ont été réalisés sur pistes fermées et avec des participants volontaires et jeunes. Ces éléments peuvent évidemment biaiser l'évaluation subjective du ressenti des participants. Ces résultats devront donc être complétés par les résultats d'une campagne expérimentale en exploitation sur l'un des sites expérimentaux du projet prévue au premier semestre 2022.

### 5.3. CONCLUSION

La navette apparaît donc comme relativement sécuritaire pour les passagers. Le risque de chute, pour les situations sur pistes testées, est limité. Cependant, certaines caractéristiques de la navette mériteraient d'être améliorées :

- Positionnement : Les positions debout sont les plus contraignantes pour les passagers. Cependant, il existe une différence entre le niveau d'inconfort ressenti pour les positionnements de dos/face et latéralement au sens de la marche (niveau d'inconfort DD/DF > DLD/DLF). Il pourrait être recommandé aux passagers debout dans la navette de privilégier un positionnement latéral au sens de la marche.
- Vitesse : il serait intéressant de pouvoir augmenter la vitesse de la navette sur certaines portions afin d'améliorer l'acceptabilité (la moitié des participants ont trouvé que l'allure de la navette était faible, cf. Chapitre 4.1.2 - 4.1.3). En effet la vitesse n'affecte pas directement le ressenti des passagers lors des phases d'accélération ou freinage en ligne droite. En revanche, cela nécessitera d'étudier plus profondément les transitions avec les virages, et surtout de limiter l'occurrence de freinages d'intempestifs.
- Profils de dynamique : les profils temporels d'accélération lors des phases de démarrage, freinage et prise de virage mériteraient d'être retravaillés afin d'améliorer les performances de la navette tout en limitant le ressenti d'inconfort/déséquilibre des passagers.



## 6. REFERENCES

- Aoki T., Uetake T., Shimoda M. (2009) Effect of passenger position on fear of danger experienced during sudden bus stops, *J. Hum. Ergol. (Tokyo)*. 38: 11–18.
- Ayik H.M., Griffin M.J. (2015) Postural stability when walking and exposed to lateral oscillatory motion: benefits from hand supports, *Ergonomics*. 58: 291–300.
- Carbonneau E., Smeesters C. (2014) Effects of age and lean direction on the threshold of single-step balance recovery in younger, middle-aged and older adults, *Gait Posture*. 39: 365–371.
- Beurier G. (2012) Analysis of the Discomfort Feeling of Standing Bus Passengers on the TEOR T1 Rouen Bus Lane, *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 48: 425–434.
- Graaf B.D., Van Weperen W. (1997) The Retention of Balance: An Exploratory Study into the Limits of Acceleration the Human Body Can Withstand without Losing Equilibrium, *Hum. Factors*. 39: 111–118.
- Nawayseh N., Griffin M.J. (2006) Effect of frequency, magnitude and direction of translational and rotational oscillation on the postural stability of standing people, *J. Sound Vib.* 298: 725–754..
- K. Omino, (2006) A New Method to Evaluate Ride Comfort Under Braking Conditions, *Railw. Technol. Avalanche*. 15: 89.
- P. Powell, R. Palacín, (2015) Passenger Stability Within Moving Railway Vehicles: Limits on Maximum Longitudinal Acceleration, *Urban Rail Transit*. 1: 95–103.
- T. Robert, P. Vallée, R. Tisserand, F. Buloup, D. Bariatinsky, J.L. Vercher, R.C. Fitzpatrick, M.L. Mille, (2018) Stepping boundary of external force-controlled perturbations of varying durations: Comparison of experimental data and model simulations. *J. Biomech.* 75: 89–95.
- Sarraf T.A., Marigold D.S., Robinovitch S.N., (2014) Maintaining standing balance by handrail grasping, *Gait Posture*. 39: 258–264.
- Schubert P., Liebher M., Kersten S., Haas C.T., (2017) Biomechanical demand analysis of older passengers in a standing position during bus transport, *J. Transp. Health*. 4: 226–236.
- Vallée P., Chabaud P., Robert T. (2016), Influence of the perturbation profile on the balance recovery threshold, in: *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Congress of the European Society of Biomechanics*, Lyon, 2016.



## ANNEXE A : QUESTIONNAIRE GLOBAL

Partie 1 : Connaissances et attentes vis-à-vis des navettes autonomes.

Utilisez-vous les transports en commun ?

Jamais	Quelquefois / an	Quelquefois / mois	Plusieurs fois / semaines	Tous les jours
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Quels types de transport en commun prenez-vous ? Entourer la/les réponse(s) correspondante(s)

Aucun      Bus      Train      Tramway      Metro      Co-voiturage

Vous prenez les transports en commun pour des raisons liées à votre / vos : Entourer  
la/les réponse(s) correspondante(s)

Travail	Loisirs	Famille	Autres
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Savez-vous en quoi consiste une navette autonome ?      OUI      NON

Si oui, exposez vos connaissances : .....

Êtes-vous déjà monté dans une navette autonome ?      OUI      NON

Si oui, comment vous êtes-vous senti ? : .....

Si non, avez-vous de l'appréhension à monter dans une navette autonome ?      OUI      NON

Si oui, pour quelles raisons ? : .....

Quelles sont vos attentes concernant les navettes autonomes ? :  
.....  
.....

Partie 2 : retour sur expérience.

Classez les positions (en fonction du sens de marche de la navette) de la plus confortable à la plus inconfortable. 1 Étant la plus confortable et 5 la plus inconfortable :

Assis de dos    Assis de face    Debout de dos    Debout de face    Debout latéral

Vous êtes-vous senti en sécurité dans la navette ?

OUI                      NON

Si non, pourquoi ? : .....

Concernant l'aspect sécuritaire, sur une échelle de 0 à 10, 0 étant dangereuse, 10 étant parfaitement sécuritaire, comment évalueriez-vous cette navette ? : .....

Trouvez-vous cette navette plus dangereuse que les transports en commun classique ? :

OUI                      NON

Si oui, pourquoi ? : .....

À l'avenir, aimeriez-vous prendre cette navette autonome comme transport en commun ? :

OUI                      NON

Si non, pourquoi ? : .....

À l'avenir, recommanderiez-vous cette navette autonome à vos proches ? :

OUI                      NON

Si non, pourquoi ? : .....



## ANNEXE B : QUESTIONNAIRE CIRCUIT

Sur l'ensemble du circuit :

Comment avez-vous trouvé l'allure de la navette ? :

Trop faible	Faible	Acceptable	Fort	Trop fort
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Comment avez-vous trouvé la gestion de la conduite ? :

Confortable	Légèrement inconfortable	Assez Inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vous êtes-vous trouvé en situation de déséquilibre dans la navette ? :

Jamais	Peu de fois	Quelquefois	Souvent	Très souvent
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vous êtes-vous trouvé en situation de danger dans la navette ? :

Jamais	Peu de fois	Quelquefois	Souvent	Très souvent
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

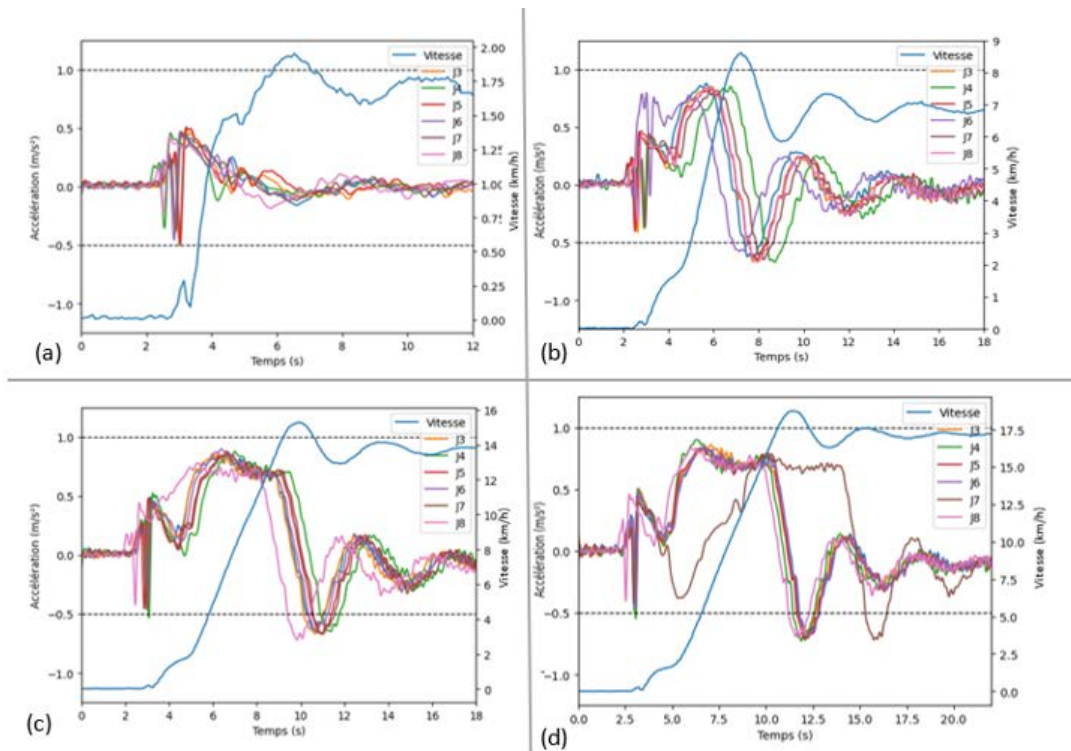
Classez les différentes phases de conduite de la navette de la plus confortable à la plus inconfortable.

1 Étant la plus confortable et 3 la plus inconfortable :

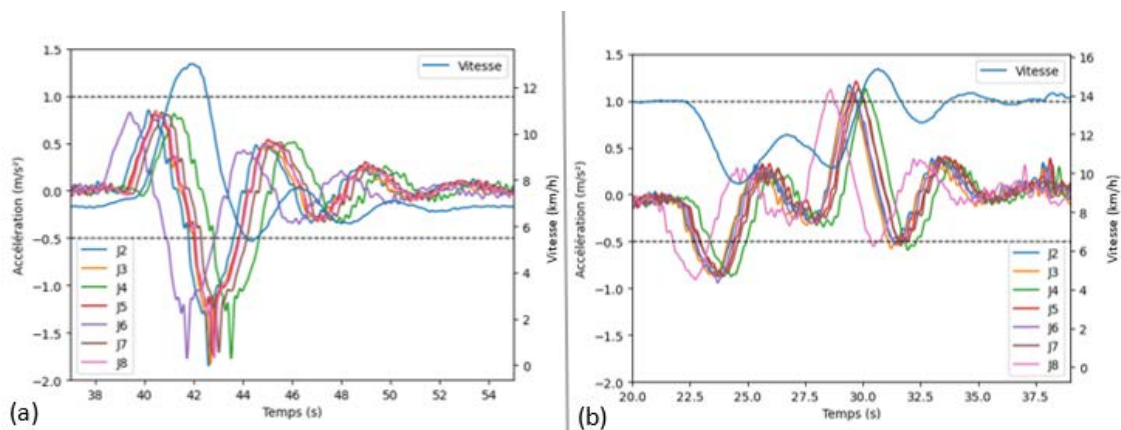
Phase d'accélération	Phase de freinage	Phase de virage
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

En termes de ressenti, quelle note donneriez-vous à la navette sur ce circuit ? 0 étant médiocre et 10 parfaitement satisfaisant : .....

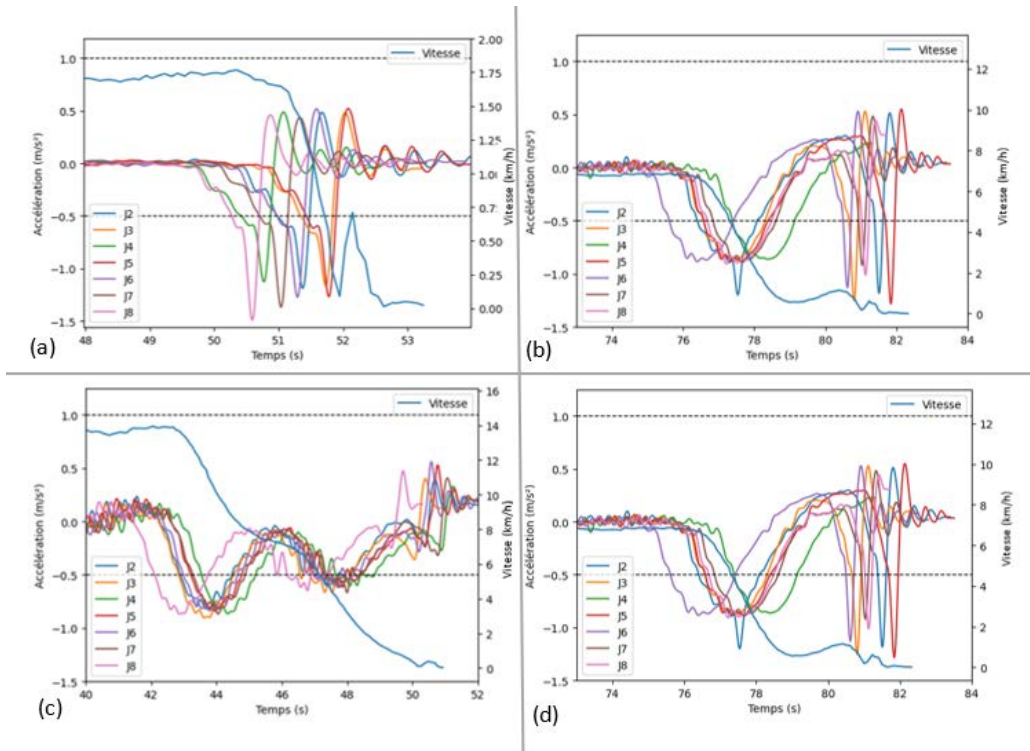
## ANNEXE C : DYNAMIQUE NAVETTE REG 2-3



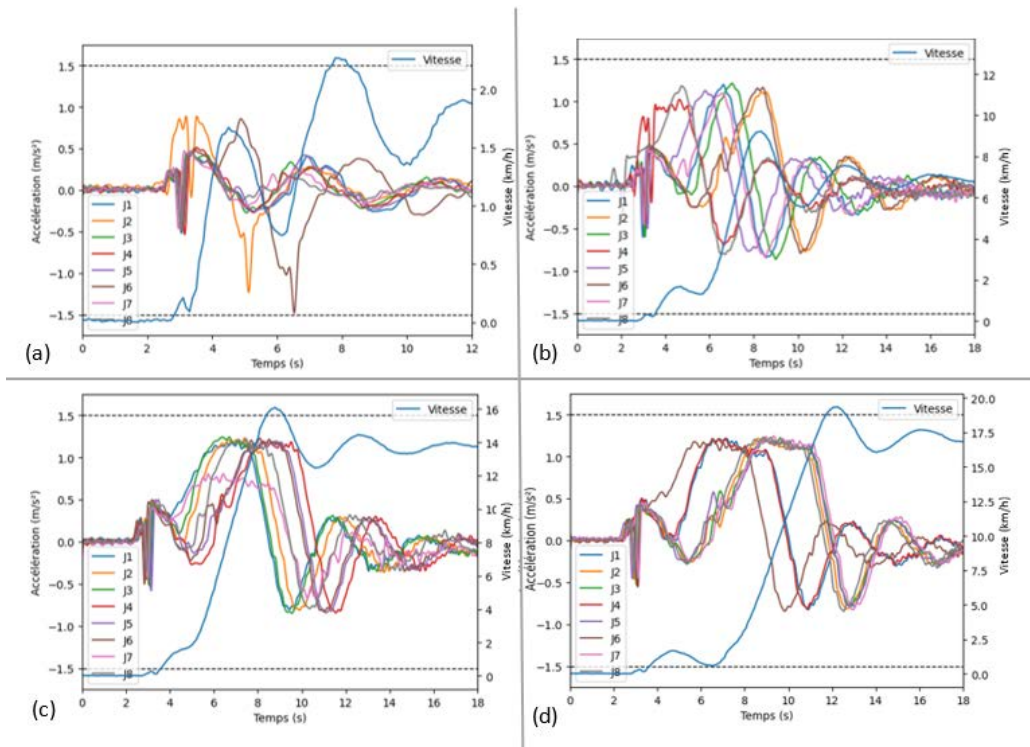
**FIGURE 29 : ACCELERATION LONGITUDINALE DE LA NAVETTE AU DEMARRAGE POUR QUATRE CONSIGNES DE VITESSE (A ; 0.5 M/S ; B : 2 M/S ; C : 4 M/S ; D : 5 M/S) EN REG2 (OBJECTIF D'ACCELERATION ACC=1 M/S<sup>2</sup> ; DEC=0,5 M/S<sup>2</sup>) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS. LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**



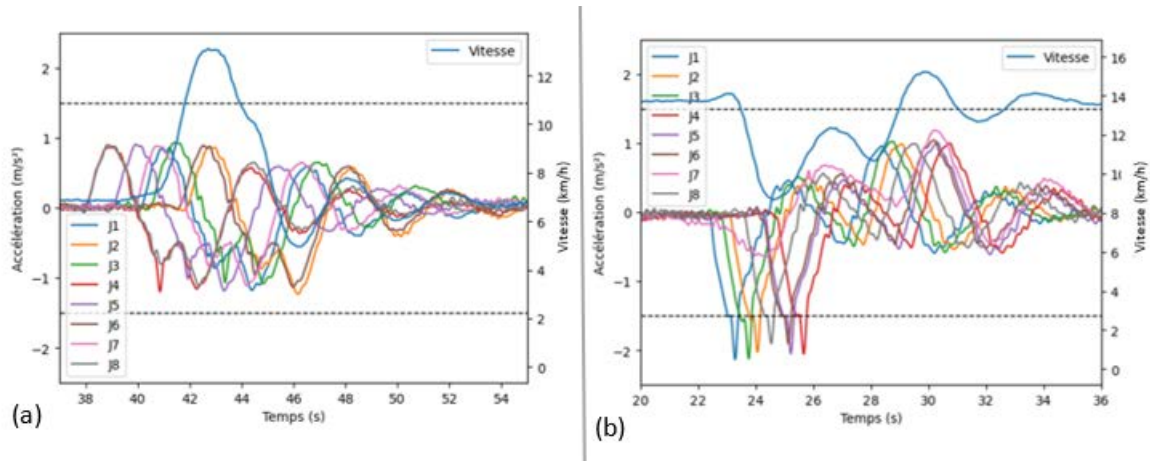
**FIGURE 30 : ACCELERATION LONGITUDINALE PENDANT LE VIRAGE POUR DEUX CONSIGNES DE VITESSE EN LIGNE DROITE ET VIRAGE (A : VD = 2 M/S & Vv = 3 M/S ; B : VD = 4 M/S & Vv = 3 M/S) EN REG2 (OBJECTIF D'ACCELERATION ACC=0,3 M/S<sup>2</sup> ; DEC=0,5 M/S<sup>2</sup>) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS. LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.FRAY**



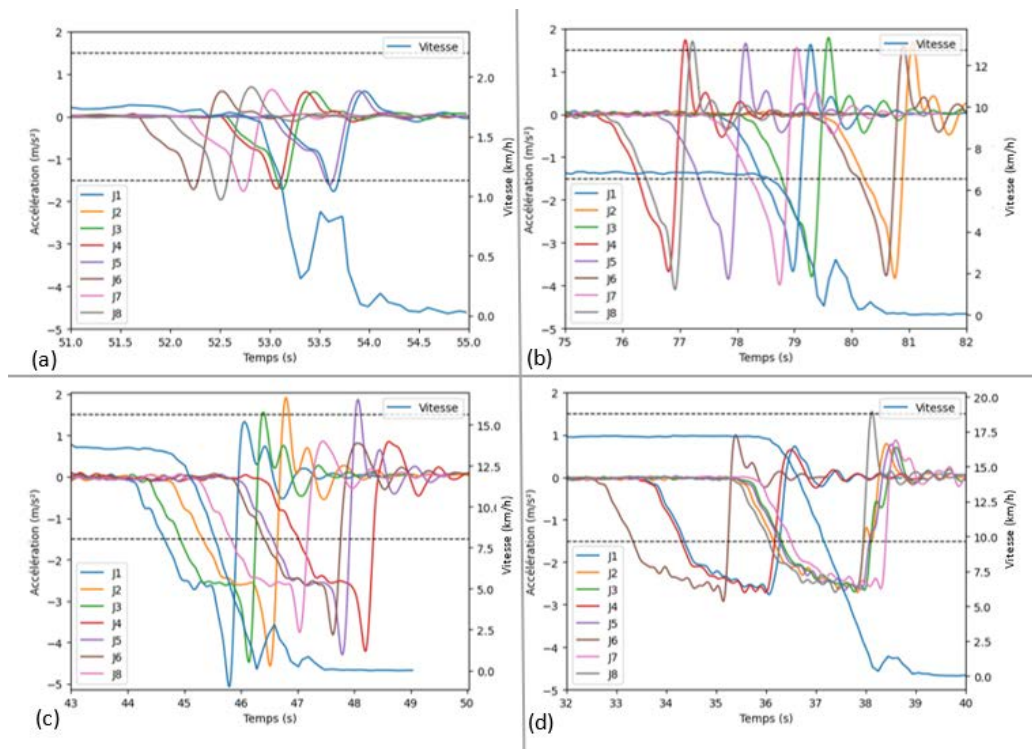
**FIGURE 31 : ACCELERATION LONGITUDINALE DE LA NAVETTE AU FREINAGE POUR QUATRE CONSIGNES DE VITESSE (A : 0.5 M/S ; B : 2 M/S ; C : 4 M/S ; D : 5 M/S) EN REG2 (OBJECTIF D'ACCELERATION  $ACC=1 M/S^2$  ;  $DEC=0,5 M/S^2$ ) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS. LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**



**FIGURE 32 : ACCELERATION LONGITUDINALE DE LA NAVETTE AU DEMARRAGE POUR QUATRE CONSIGNES DE VITESSE (A : 0.5 M/S ; B : 2 M/S ; C : 4 M/S ; D : 5 M/S) EN REG3 (OBJECTIF D'ACCELERATION  $ACC=1,5 M/S^2$  ;  $DEC=1,5 M/S^2$ ) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS. LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**



**FIGURE 33 : ACCELERATION LONGITUDINALE PENDANT LE VIRAGE POUR DEUX CONSIGNES DE VITESSE EN LIGNE DROITE ET VIRAGE (A :  $V_D = 2 \text{ m/s}$  &  $V_V = 3 \text{ m/s}$  ; B :  $V_D = 4 \text{ m/s}$  &  $V_V = 3 \text{ m/s}$ ) EN REG3 (OBJECTIF D'ACCELERATION  $ACC=1,5 \text{ m/s}^2$  ;  $DEC=1,5 \text{ m/s}^2$ ) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS. LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**



**FIGURE 34 : ACCELERATION LONGITUDINALE DE LA NAVETTE AU FREINAGE POUR QUATRE CONSIGNES DE VITESSE (A :  $0.5 \text{ m/s}$  ; B :  $2 \text{ m/s}$  ; C :  $4 \text{ m/s}$  ; D :  $5 \text{ m/s}$ ) EN REG3 (OBJECTIF D'ACCELERATION  $ACC=1,5 \text{ m/s}^2$  ;  $DEC=1,5 \text{ m/s}^2$ ) POUR CHACUNE DES SESSIONS DE TESTS. LA VITESSE (EN BLEU) D'UNE DES SESSIONS EST PRESENTEE A TITRE D'EXEMPLE.**

## ANNEXE D : QUESTIONNAIRE « ESSAIS UNITAIRES »

Durant cet essai, avez-vous trouvé le démarrage de la navette...

Confortable    Légèrement inconfortable    Assez Inconfortable    Inconfortable    Très inconfortable    Extrêmement inconfortable

50/100

Durant cet essai, avez-vous trouvé la prise de virage de la navette...

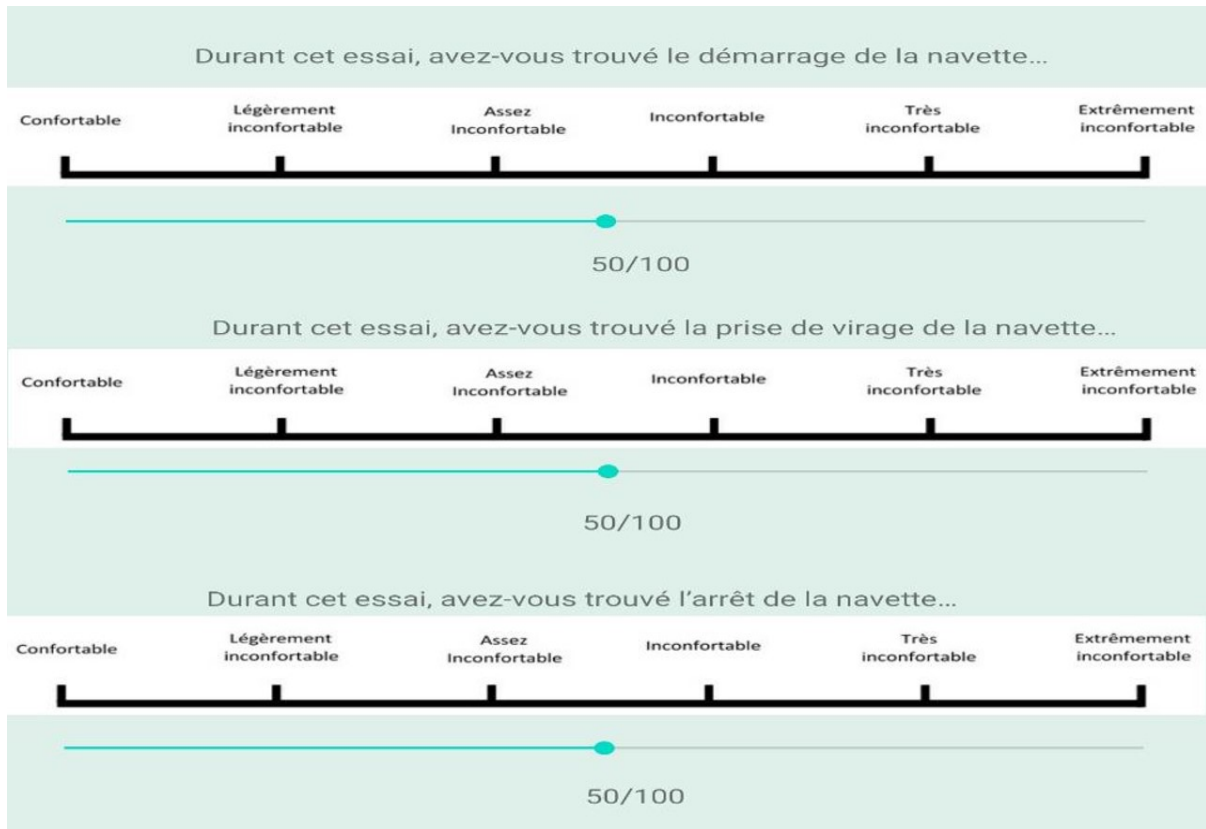
Confortable    Légèrement inconfortable    Assez Inconfortable    Inconfortable    Très inconfortable    Extrêmement inconfortable

50/100

Durant cet essai, avez-vous trouvé l'arrêt de la navette...

Confortable    Légèrement inconfortable    Assez Inconfortable    Inconfortable    Très inconfortable    Extrêmement inconfortable

50/100





## ANNEXE E : QUESTIONNAIRE « FREINAGE D'URGENCE »

Durant cet essai, avez-vous trouvé l'arrêt d'urgence de la navette...

Acceptable      Assez Acceptable      Légèrement Acceptable      Peu Acceptable      Assez inacceptable      Inacceptable



50/100



expérimentations  
navettes autonomes



Tentez l'expérience